

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

A szennyvíztelepi biogáz termelő fermentációs folyamatok nyomon követése kémiai és biokémiai módszerekkel

Kardos Levente

Témavezető:

Dr. Záray Gyula, egyetemi tanár, DSc
(ELTE Kémiai Intézet)

Konzulens:

Dr. Barkács Katalin, adjunktus (ELTE Kémiai Intézet)
Dr. Oláh József, tudományos tanácsadó (FCSM Zrt.)

Környezettudományi Doktori Iskola

Vezető: Dr. Kiss Ádám, egyetemi tanár, DSc (ELTE Fizikai Intézet)

Környezetkémiai Program

Vezető: Dr. Turányi Tamás, egyetemi tanár, DSc (ELTE Kémiai Intézet)



**Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Környezettudományi Kooperációs Kutató Központ**

2012

1. Bevezetés, problémafelvetés	6
2. Szakirodalmi áttekintés	9
2.1. A kommunális szennyvíztisztítás vízvonalai technológiájának és a szennyvíziszap keletkezésének bemutatása	9
2.1.1. <i>Az elsőleges tisztítási (mechanikai) fokozat részai</i>	9
2.1.2. <i>A másodlagos tisztítási (biológiai) fokozat részai</i>	11
2.1.3. <i>A harmadlagos (tercier) tisztítási fokozat részai</i>	13
2.2. A szennyvíziszap kezelés áttekintése	14
2.3. Az anaerob lebontás általános jellemzése	19
2.3.1. <i>Az anaerob lebontás rövid története</i>	19
2.3.2. <i>Az anaerob lebontási folyamat</i>	22
2.3.2.1. <i>A hidrolízis</i>	25
2.3.2.2. <i>A savképzés</i>	26
2.3.2.3. <i>Az ecetsavképzés</i>	26
2.3.2.4. <i>A metánképzés</i>	27
2.3.3. <i>Az anaerob rothasztók metánermelő mikrobaközösségének jellemzése</i>	27
2.3.4. <i>Az anaerob fermentáció körülményei</i>	29
2.3.4.1. <i>A hőmérséklet</i>	31
2.3.4.2. <i>Kémhatás</i>	32
2.3.4.3. <i>A szubsztrát minősége, összetétele</i>	32
2.3.4.4. <i>Koszubsztrát hatás</i>	33
2.3.4.5. <i>Fajlagos szervesanyag terhelés</i>	35
2.3.4.6. <i>Toxikus anyagok</i>	35
2.3.4.7. <i>Az előkezelés hatása az anaerob lebontásra</i>	37
2.3.4.7.1. <i>Enzimes előkezelés</i>	38
2.3.4.7.2. <i>Ultrahangos előkezelés</i>	39
2.4. Az anaerob lebontás folyamatát nyomon követő klasszikus üzemellenőrzési paraméterek	40
2.5. Az anaerob lebontás nyomon követését segítő enzimaktivitás vizsgálatok	41
2.5.1. <i>Dehidrogenáz enzimaktivitás</i>	41
2.5.1.1. <i>A meghatározás elméleti alapja</i>	41
2.5.1.2. <i>A trifenil-tetrazólium-klorid (TTC)</i>	42
2.5.1.3. <i>A dehidrogenáz enzimaktivitás meghatározása</i>	43
2.5.1.4. <i>Az oxigén koncentráció szerepe</i>	43
2.5.1.5. <i>A TTC koncentráció szerepe</i>	44
2.5.1.6. <i>Az inkubációs idő szerepe</i>	45
2.5.1.7. <i>A vizsgálati módszerek értékelése</i>	45

2.5.2. <i>Proteáz enzimaktivitás</i>	46
2.5.3. <i>Lipáz enzimaktivitás</i>	47
2.5.4. <i>Celluláz enzimaktivitás</i>	47
3. Anyag és módszer	49
3.1. Kísérleti munka során alkalmazott berendezések	49
3.1.1. <i>A vizsgálatok színhelyének bemutatása</i>	49
3.1.1.1. <i>A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep és az iszapkezelésének története</i>	49
3.1.1.2. <i>Az iszapvonalai technológia bemutatása</i>	51
3.1.1.3. <i>A féliüzemi reaktorok</i>	53
3.1.1.4. <i>Az üzemi fermentorok</i>	54
3.2. A telepen alkalmazott fizikai-kémiai paraméterek (ellenőrző paraméterek)	
meghatározása	55
3.2.1. <i>Hőmérséklet mérése</i>	55
3.2.2. <i>Szárazanyag-tartalom meghatározása</i>	55
3.2.3. <i>Szervesanyag-tartalom meghatározása</i>	55
3.2.4. <i>A kémhatás meghatározása</i>	56
3.2.5. <i>Az illósav meghatározása</i>	56
3.2.6. <i>A lúgosság meghatározása</i>	56
3.2.7. <i>A gázmennyiség és gázösszetétel meghatározása</i>	57
3.3. A telepen alkalmazott egyéb paraméterek meghatározása	57
3.3.1. <i>Redoxipotenciál</i>	57
3.3.2. <i>Enzimaktivitás vizsgálatok</i>	57
3.4. Az adatok feldolgozásához és kiértékeléshez felhasznált módszerek	58
3.5. Számított paraméterek	58
3.5.1. <i>Fajlagos szervesanyag terhelés</i>	58
3.5.2. <i>Fajlagos gázhozam és a gázösszetétel</i>	58
3.5.3. <i>PASW Statistics által számolt adatok</i>	59
4. Kísérleti rész	60
4.1. Az enzimaktivitás vizsgálatok adaptálása anaerob iszapok jellemzésére	60
4.1.1. <i>A dehidrogenáz enzimaktivitás módszer adaptálása</i>	60
4.1.2. <i>A proteáz enzimaktivitás módszer adaptálása</i>	64
4.1.3. <i>A lipáz enzimaktivitás módszer adaptálása</i>	68
4.1.4. <i>A celluláz enzimaktivitás módszer adaptálása</i>	71
4.2. Az enzimaktivitás módszerek adaptálásakor nyert eredmények összefoglalása	74
4.3. A kísérleti periódusok bemutatása	74

4.3.1. A mezofil és a termofil rothasztás enzimaktivitásának összehasonlítása	
<i>félfüzemi és üzemi reaktorokban</i>	75
<u>4.3.1.1. A félfüzemi kísérletsorozat bemutatása</u>	75
4.3.1.1.1. A félfüzemi kísérletsorozat eredményei	76
<u>4.3.1.2. Az üzemi kísérletsorozat bemutatása</u>	83
4.3.1.2.1. Az üzemi kísérletsorozat eredményei	83
4.3.2. A félfüzemi és üzemi kísérletsorozat összehasonlítása és értékelése	90
4.3.3. A hőmérséklet-változtatás hatásának vizsgálata félfüzemi reaktorokban	91
<u>4.3.3.1. A hőmérséklet átüzemelési kísérletsorozat eredményei</u>	92
4.3.4. Üzemeltetési probléma okozta drasztikus hőmérséklet-változás hatásának jelzése enzimaktivitás vizsgálatokkal	98
<u>4.3.4.1. Üzemeltetési probléma okozta drasztikus hőmérséklet-változás hatásának jelzése enzimaktivitás vizsgálatokkal – eredmények</u>	98
4.3.5. A szervesanyag terhelés és az enzimaktivitás kapcsolata	100
<u>4.3.5.1. A félfüzemi kísérletsorozat bemutatása</u>	100
4.3.5.1.1. A félfüzemi kísérletsorozat eredményei	101
<u>4.3.5.2. Az üzemi kísérletsorozat bemutatása</u>	102
4.3.5.2.1. Az üzemi körülmények között végzett kísérletsorozat eredményei	103
4.3.6. Mechanikai előkezelés (roncsolás) hatásának vizsgálata	106
<u>4.3.6.1. Az előkezelés (mechanikai roncsolás) hatása a fermentációra kísérletsorozat eredményei</u>	106
4.3.7. Enzimméztípus alkalmazásának lehetőségei	108
<u>4.3.7.1. Enzimméztípus alkalmazhatóságának vizsgálata</u>	109
4.3.8. Szennyvíztisztítás és szervesanyagok együtt rothasztásának (növényi hulladék koszubsztrát hatása) bemutatása félfüzemi reaktorban	113
<u>4.3.8.1. Szennyvíztisztítás és szervesanyagok együtt rothasztásának (növényi hulladék koszubsztrát hatása) vizsgálati eredményei félfüzemi reaktorban</u>	114
5. Az enzimaktivitás mérések gyakorlati jelentősége	117
6. Összefoglalás	118
7. Summary	121
8. Köszönetnyilvánítás	124
9. Irodalomjegyzék	125
10. Ábrajegyzék	132
11. Táblázatjegyzék	134
12. Mellékletek	135

Fogalomjegyzék

Biokémiai oxigénigény (BOI₅): a vízben lévő szerves anyagok mikroorganizmusok által történő (biokémiai) oxidációjához szükséges oldott oxigén mennyisége 5 nap alatt, mértékegysége: O₂ mg/dm³.

Fajlagos szervesanyag terhelés: egységnyi idő alatt, az egységnyi reaktor térfogatra vonatkoztatott, a reaktorba betáplált szervesanyagot jelenti, mértékegysége: kg/m³ *d.

Fermentáció:

Hidraulikus kapacitás: a reaktorba időegység alatt betáplált szennyvíziszap térfogata, mértékegysége: m³/d vagy dm³/h.

Hidraulikus tartózkodási idő (HRT): az eleveniszap vagy biomassza tényleges tartózkodási ideje a reaktorban, vagy medencében. A hidraulikus tartózkodási idő tehát iszaprecirkuláció nélküli megoldásnál megegyezik az iszapkorral, míg recirkuláció esetén ez az idő a recirkulációnak megfelelően növekszik.

Kémiai oxigénigény (KOI_{cr}): azon oxidálószer (K₂Cr₂O₇) mennyiséggel ekvivalens oxigén mennyisége, amely elfogy savas közegben, 150°C-on, 2 órás roncsoló oxidációkor a szerves és szervetlen anyagok oxidálására, mértékegysége: O₂ mg/dm³.

Kavitronozás: ultrahangos iszap előkezelési módszer. Az ultrahang hatására kialakuló nyomásváltozás az iszapban lévő sejtek roncsolását okozza.

Koszubsztrátok: az alap-szubsztráthoz (alap-tápanyag) adagolt kiegészítő anyagok, amelyek a mikroorganizmusok számára tápanyagként szolgálnak. Koszubsztrátok nemcsak szennyvíziszapok lehetnek, hanem növényi hulladék (kerti hulladék) és/vagy állati trágya is (konyhai, vágóhídi vagy kerti hulladék).

Metántermelés:

Szubsztrát: 1. bármilyen kémiai vegyület, amely egy adott reakcióban egy enzim katalitikus aktivitásának hatására átalakulást szenved (enzimszubsztrát). 2. a fermentorba táplált tápanyagként szolgáló anyag.

Rövidítések magyarázata:

Nm³ = normál m³ (0,101 MPa, 0°C)

CMC = karboximetil-cellulóz

PNF = para-nitro-fenol

PNFP = para-nitro-fenil-palmitát

TF = 2,3,5-trifenil-formazán

TTC = 2,3,5-trifenil-tetrazólium-klorid

EWC = European Waste Catalogue,

Európai Hulladék Katalógus

Szervesa. = szervesanyag

1. Bevezetés, problémafelvetés

A kommunális szennyvíztisztítás során nagy mennyiségű szennyvíziszap keletkezik, amelynek kezelése kiemelkedően fontos környezetvédelmi feladat. A szennyvíziszap kezelésének egyik gazdaságos módja az anaerob lebontás (fermentáció, amelyet az iszapkezelés gyakorlatában rothasztásnak is neveznek). Az anaerob fermentációt széles körben alkalmazzák szennyvíziszapok stabilizálására és nagy szervesanyag tartalmú szennyvizek tisztítására is. Minden jól működő anaerob fermentor megegyezik abban, hogy benne a szervesanyag átalakul metán tartalmú biogázzá, amely energetikai felhasználása az adott telep számára meghatározó jelentőségű (Bai 2007). A lebontás során keletkező biogáz fedezi többek között a szennyvíztisztító telep hő- és villamos energia-fogyasztásának jelentős részét, ezért a biogáz mennyiségének növelése kiemelt feladat. A biogáz mennyiségének növelését az anaerob lebontás folyamatainak alapos megismerésével érhetjük el.

Az egyes rothasztók egyensúlya, hatásfoka azonban erősen különbözhet egymástól. A rothasztó üzemeltetését meghatározza a szubsztrát minősége és mennyisége, a reaktorban kialakult baktériumközösség, valamint többek között a hőmérséklet, a terhelés, a tartózkodási idő, a keverés hatékonysága és a rothasztó tartály kialakítása is.

Az anaerob reaktorokban lejátszódó folyamatok még pontosabb megismerése hozzájárulhat az anaerob iszapstabilizáció fejlesztéséhez, az optimális üzemeltetési körülmények eléréséhez, illetve a biogáz mennyiségének növeléséhez. Az anaerob rothasztással a hulladéknak számító szennyvíziszapból (EWC kód: 19 08 05, települési szennyvíztisztításából származó iszapok, 16/2011. KöM rendelet) megújuló energiaforrásnak számító biogázt lehet előállítani. Az anaerob fermentáció előnye más iszapkezelési eljárásokkal (pl.: lerakás) szemben, hogy alkalmazásakor nemcsak az iszap térfogata, hanem a patogének száma is jelentősen lecsökken és emellett biogáz képződik. Megjegyezendő, hogy az anaerob fermentáció után a kirothadt iszap még a mezőgazdaságban hasznosítható, illetve el is égethető.

A biogáz mennyisége növelhető egyéb, nem szennyvíztelepi szerves hulladék (koszubsztrátok) iszappal történő együttrothasztásával is. Az iszapstabilizálással és más szerves hulladékoknak az iszappal történő együttes lebontásával a nagy mennyiségben keletkező, könnyen bomló szervesanyag ártalmatlanítása valószínűsíthető meg, amely korunk egyik kiemelkedő hulladékgazdálkodási feladata.

Doktori kutatómunkám során célul tűztem ki a kommunális szennyvíziszap anaerob lebontásának optimalizálását, amely a biogáz mennyiségének növelését eredményezi. A cél elérése érdekében az anaerob lebontás első (sok esetben nem is elkülönített), sebesség meghatározó lépcsőjét, a hidrolízist kívántam vizsgálni. A fermentorokban végbemenő folyamatok jellemzésére a szennyvíztelepi laboratóriumok számára csak a (mára már klasszikusnak tekinthető) fizikai-kémiai paraméterek állnak rendelkezésre. Ezek a szárazanyag-, a szervesanyag-tartalom, a kémhatás, az illósav-, a lúgosság-koncentráció, a gázmennyiség és a gázösszetétel. Bizonyos esetekben vizsgálják a redoxipotenciált is. Ezek a paraméterek sok esetben nem adnak kellő információt a reaktorokban bekövetkező változásokról, illetve nem jelzik elég gyorsan az üzemeltetés és így a biogáz-kihozatal, -termelés érdekében fontos változásokat.

A folyamatok hatékonyabb nyomon követését biokémiai paraméterekkel, enzimaktivitás vizsgálatokkal kívántam meghatározni. Az enzimaktivitások vizsgálatát az anaerob fermentáció nyomon követésére már 1967-ben Thiel és Hattingh is javasolta (Thiel és Hattingh 1967). A hidrolitikus enzimaktivitás vizsgálatokkal az anaerob lebontás első, sebesség meghatározó lépcsője ugyanis jól jellemezhető. Kísérleteim során félüzemi és üzemi reaktorokból származó iszapminták enzimaktivitásait kívántam meghatározni. A sejtek összaktivitásának jellemzésére a dehidrogenáz, míg a szennyvíziszap gyakori szubsztrát (elsősorban fehérje- és zsírtartalom) koncentráció változásainak nyomon követésére a proteáz és a lipáz, illetve növényi hulladék, mint koszsusztrát rothasztása esetén a celluláz enzimaktivitás vizsgálatok alkalmazhatók. Anaerob szennyvíziszap minták enzimaktivitás vizsgálataira nincsenek nemzetközileg elfogadott standardok. Kísérleti munkámban ezért először adaptálni, illetve átalakítani kívántam a szakirodalomban található, a nem szennyvíziszap minták vagy nem anaerob szennyvíziszap minták vizsgálataira használt enzimaktivitás mérési módszereket, tekintve, hogy a szakirodalomban ismertetett enzimaktivitás vizsgálatok aerob eleveniszapra, illetve anaerob talajmintákra vonatkoznak. Célom volt olyan enzimaktivitás vizsgálatok kidolgozása és alkalmazása, amelyekkel az anaerob fermentorban lejátszódó folyamatok az eddigieknél jobban jellemezhetők és az üzemeltetés számára is kellő információval szolgálhatnak. Céломnak tekintetem továbbá, hogy a kiválasztott enzimaktivitás vizsgálatokat mind félüzemi, mind pedig üzemi fermentorokból származó iszappal is elvégezzem. Az alkalmazott enzimaktivitás vizsgálatokat úgy kívántam kialakítani, hogy gyorsan és viszonylag olcsón

elvégezhetők, így az átlagos felszereltségű szennyvíztelepi laboratóriumok számára is kivitelezhetők legyenek.

Kutatásaim során hat kísérleti periódust kívántam vizsgálni, amelyek a következők:

1. A mezofil és a termofil hőmérsékletű rothasztás összehasonlítása enzimaktivitás vizsgálatokkal félüzemi és üzemi reaktorokban.
2. A hőmérséklet-változtatás hatásának vizsgálata félüzemi reaktorokban és a folyamatok nyomon követése kémiai és biokémiai paraméterekkel.
3. A szennyvíziszap terhelés (szervesanyag terhelés változtatása) és az enzimaktivitás kapcsolata félüzemi és üzemi körülmények között.
4. Mechanikai előkezelés (roncsolás) hatásának vizsgálata az iszapfermentációra félüzemi fermentorban.
5. Enzimkészítmény alkalmazásának lehetőségei a biogáz termelés fokozása érdekében laboratóriumi körülmények között.
6. Szennyvíziszap és szervesanyagok (tejipari szennyvíz, növényi hulladék) együtt rothasztásának vizsgálata (koszubsztrát hatás) félüzemi reaktorokban és a folyamatok nyomon követése enzimaktivitás vizsgálatokkal.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A kommunális szennyvíztisztítás vízvonal technológiájának és a szennyvíziszap keletkezésének bemutatása

A kommunális szennyvizek tisztítása esetében a mai kor környezetvédelmi kihívásainak megfelelően három fokozatot különítenek el, amelynek technológiai kivitelezése során számos alternatíva lehetséges. Egy háromfokozatú, aerob, eleveniszapos tisztítási eljárást mutatok be a kutatás helyszínéül szolgáló Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep példáján keresztül.

Az **elsődleges tisztítás** (mechanikai (I.) fokozat) célja a durva szennyeződések eltávolítása, illetve a lebegőanyagok kivonása, a szennyvíz biológiai tisztításra történő előkészítése. Önállóan csak ritkán felel meg az innen kikerülő előtisztított szennyvíz a befogadóba bocsátás minőségi követelményeinek, ezért legtöbb esetben **másodlagos tisztítási fokozatra** (biológiai (II.) fokozatra) is szükség van, amelynek célja a nem ülepíthető kolloidok és oldott szervesanyagok eltávolítása, amely mikrobiológiai folyamatok révén következik be. A **harmadlagos tisztítási fokozat** (tercier (III.) fokozat) a szennyvízben még megtalálható szerves tápanyagok (nitrogén-, foszfortartalmú vegyületek), illetve a másodlagos tisztítás eredményeként esetleg létrejött vegyületek eltávolítását jelenti. A nitrogén és foszfor tápanyagok eltávolítása mindenképpen szükséges, mert a befogadóba jutva eutrofizációt eredményezhetnek. A tápanyagok eltávolítása kémiai, illetve biológiai módszerekkel történhet. A terciér fokozat után az ÁNTSz (Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat) előírásainak megfelelően a bemutatott telepen márciustól októberig fertőtlenítést kell alkalmazni. (Vermes 1997, Tamás 1998, Varga 1999)

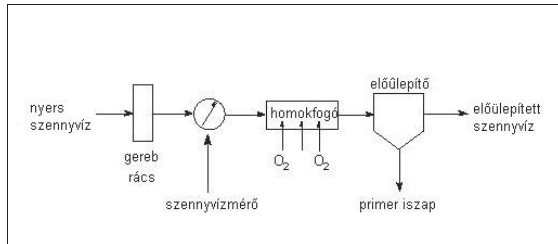
2.1.1. Az elsődleges tisztítási (mechanikai) fokozat részei

A bemutatásra kerülő mechanikai fokozat technológiai folyamatát a 1. ábra szemlélteti. A technológia elemei a következők:

Gereb, rács: a durva, darabos szennyezések eltávolítására szolgál. Az innen kikerülő hulladékot rácsszemétnek nevezik, amely fertőtlenítéssel vagy fertőtlenítés nélkül hulladéklerakóra kerül.

Homokfogó: a gyorsan ülepedő szervesetlen részecskék (homokszemcsék) kiülepítését szolgálja a szennyvízből. A szennyvíz áramlási sebességének csökkentésével a részecskék kiülepednek. A levegő befúvatás hatására a

homokszemcsékre tapadt lebegő, szerves szennyező lekerül („mossák a homokot”), ezzel az is elérhető, hogy a szennyvíz rothadása ne induljon be. A légbefúvás révén az olaj és zsír flotációja is megvalósul, amely ezután kotróberendezésekkel eltávolítható. „Mosott” homok kerül ki a rendszerből, amelyet az építőiparban hasznosítanak (pl.: útalapba építik be).



1. ábra: A háromfokozatú, eleveniszapos szennyvíztisztítási technológia mechanikai fokozatának folyamatábrája (saját szerkesztés)

Előülepítő: az áramlási viszonyok megváltoztatásával csökkentik az áramlási sebességet, ezért további részecskék ülepednek ki iszap formájában. Az előülepítőtől a primer iszap kerül ki. Az első tisztítási fokozatot az előülepített szennyvíz hagyja el, amely nagy mennyiségben oldott, kis mennyiségben lebegő szervesanyagot tartalmaz. Ha derítés is van, akkor csak oldott szervesanyagot tartalmaz az előülepített szennyvíz (Tamás 1998, Varga 1999). A 2. ábrán a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep egyik előülepítője látható.

Az előülepített iszap a modern szennyvíztisztító telepeken az iszapkezelés folyamataiban anaerob körülmények között a biológiai medencéből kikerülő, nem recirkuláltatott, főlös iszappal együtt vagy akár külön kezelve biogázzá alakítható.

A modern telepeken az előbb ismertetett valamennyi technológiai lépés fedett medencékben, zárt helyen zajlik. Az elszívott levegőt hatékonyan üzemelő bűztelenítő berendezéseken, biofiltereken vezetik át.

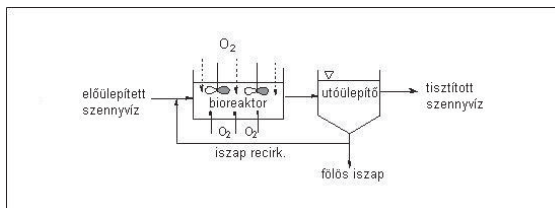


2. ábra: Dorr-típusú előüleptítő (Forrás: Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep, Budapest, Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.)

2.1.2. A másodlagos tisztítási (biológiai) fokozat részei

Biológiai medence: az oldott szerves szennyeződések eltávolítása történik az eleveniszap mikroorganizmusai által. A baktériumok életfolyamataihoz biztosítani kell a megfelelő mennyiségű oxigén bejutását. Az oxigén befűvása sűrített levegő formájában történik turbofúvókák segítségével. A mikrobiológiai lebontás (oxidáció) révén a szennyvíz szervesanyag tartalma lecsökken. Az oxigén befűvás mellett szükséges az állandó keverés, valamint az, hogy az iszap koncentrációja állandó legyen, ezért recirkuláltatják az iszapot. A recirkuláció folyamán az utóüleptetőből kikerült iszap egy részét visszavezetik a biológiai medence elejére. A biológiai medencét az eleveniszap és tisztított víz keveréke hagyja el (Schroeder 1977, Benefield és Randall 1980, Tamás 1998, Varga 1999). A biológiai medencét biológiai reaktornak, illetve levegőztetett medencének is nevezik, a folyamatábrát a 3. ábra, míg a 4. ábra az eleveniszapos biológiai medencét mutatja be.

Többször a biológiai medence elején egy anoxikus részt alakítanak ki, amely elődenitrifikációt tesz lehetővé, ezzel segítve a harmadik fokozatban található nitrifikáció-denitrifikáció hatékonyságát.



3. ábra: A háromfokozatú, eleveniszapos szennyvíztisztítási technológia biológiai fokozatának folyamatábrája (saját szerkesztés)

A toxikus anyagok (pesticidok és bomlástermékeik, fenolok stb.) hatására a biológiai lebontás és ezzel együtt az elfolyó, tisztított víz minősége romolhat. Nagy koncentrációban a telepre érkező toxikus komponensek veszélyeztetik az eleveniszap baktériumközösségét (Schroeder 1977). A telep ezáltal nem tudja tartani a befogadóba bocsátás kötelező határértékeit, amely további környezetvédelmi problémát szül, illetve a telepet bírsággal is sújthatják. Az eleveniszap (baktériumközösség) védelme elengedhetetlenül szükséges feladat a szennyvíztisztításban, hiszen a kommunális szennyvízzel az ipari szennyvizek is bekerülhetnek a szennyvíztisztító telepre.

Utóülepítő: a tisztított víz és az eleveniszap szétválasztására alkalmazzák. A kiülepedett eleveniszap egy részét szivattyúkkal juttatják vissza a biológiai medencékbe (recirkuláltatás) az állandó eleveniszap-koncentráció elérése érdekében. Az utóülepítőt a tisztított szennyvíz, valamint az eleveniszap hagyja el, amely egyik része a recirkuláltatott, a másik része pedig a (nem recirkuláltatott) fölös eleveniszap (Tamás 1998, Varga 1999). A fölösiszap az előülepített iszappal együtt (vagy akár önállóan is) rothasztásra kerül (Vermees 1997). Az előülepített iszapban több a szervesanyag, valamint töményebb, míg a hígabb fölös iszapban nagy mennyiségben szervesanyagok vannak jelen (Varga 1999).



4. ábra: Biológiai fokozat (Forrás: Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep, Budapest, Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.)

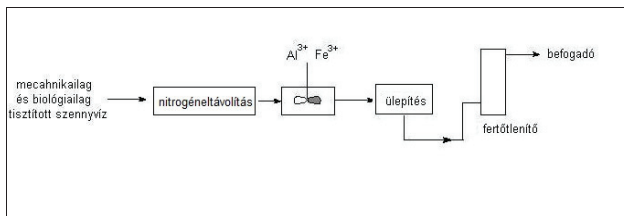
2.1.3. A harmadlagos (tercier) tisztítási fokozat részei

A tercier fokozatban a nitrogén- és foszfor-vegyületek eltávolítása történik. A biológiai fokozatban a szerves nitrogén vegyületek nitrogénje az ammonifikáció folyamatában ammóniumionná alakulnak, amelyek a nitrifikáció során nitráttionon keresztül nitráttionná oxidálódnak. A nitráttion a denitrifikáló baktériumok életfolyamatainak és az adagolt szervesanyagoknak (pl.: metanol) köszönhetően inert nitrogéngázzá redukálódik (Schroeder 1977). Az 5. ábrán a nitrifikáció és denitrifikáció folyamatait a nitrogéneltávolítás jelzi.

Ha nem történt foszforeltávolítás (derítés hiányában) a mechanikai fokozatban, akkor itt kerülhet sor vegyszeres kezelésre a foszforeltávolítás érdekében. Vas- vagy alumíniumion tartalmú vegyületeket adagolnak a szennyvízhez:



Az (1) és (2) reakcióknak köszönhetően rosszul oldódó alumínium(III)-foszfát, illetve vas(III)-foszfát csapadékok képződnek, amelyek ülepítéssel eltávolíthatók. A koagulálószer egy része a lebegőanyagok felületi töltésének áttöltésére, a maradék a hidrolízisre, illetve a foszfáttionnal történő reakcióra fordítódik. A tercier fokozat folyamatábráját az 5. ábra mutatja be. A harmadlagos (tercier) tisztítási fokozat után általában klórgázzal, időszakosan fertőtlenítéssel kerül sor a patogén mikroorganizmusok inaktíválása érdekében.



5. ábra: A háromfokozatú, eleveniszapos szennyvíztisztítási technológia tercier fokozatának folyamatábrája (saját szerkesztés)

2.2. A szennyvíziszap kezelés áttekintése

Ahhoz, hogy a szennyvíztisztítás folyamata során keletkezett szennyvíziszap további célokra felhasználható vagy biztonságosan elhelyezhető legyen, kezelése szükséges. A kezelés módja annak függvénye, milyen módon kívánják az iszapot hasznosítani, illetve elhelyezni, valamint milyen a szennyvíz és az abból keletkezett iszap összetétele. Hasznosítható összetevői mellett számos komponense lehet, ami hasznosításának és elhelyezésének lehetőségeit korlátozza, ilyenek például a nehézfémek vagy a makrotápelem-tartalom.

A szennyvíziszap kezelés célja az iszap rothadó- és fertőzőképességének megszüntetése, a térfogat- és nedvességsökkentés, valamint az iszapban lévő szervesanyag, tápelem, nyomelem átalakítása hasznosítható termékekké. A kezelések eredményeképpen a bűz- és szagártalmak is jelentősen csökkenthetők. (Verme 1997). Az iszapkezelés lépései a következők:

Sűrítés: az iszap víztartalmának csökkentése révén annak mennyisége jelentősen lecsökkenhet, további kezelése egyszerűbben kivitelezhető. A sűrítés történhet gravitációs módszerrel, valamint szűréssel. Leginkább a gravitációs módszer az elterjedt. Az elérhető maximális szárazanyag-tartalom 6%. Ez a lépés kötelező technológiai folyamat. (Tamás 1998, Barótfi 2005)

Stabilizálás (anaerob rothasztás, biogáztermelés): a szervesanyag lebontása aerob, illetve leginkább anaerob módszerrel történhet. Az anaerob lebontás (rothasztás) során fontos szerepe van a hőmérsékletnek. A rothasztás mezofil (átlag 35°C-on), illetve termofil (átlag 55°C-on) történik. A stabilizálás eredményeképpen metán tartalmú biogáz képződik, amely energetikai felhasználásával a telep villamos energia igénye kielégíthető (Tchobanoglous et al. 2003, Öllös et al. 2010). Ez a lépés nem kötelező, de

a szennyvíziszapból megtermelendő biogáz miatt kiépítése mindenképpen megfontolandó (Bai 2005).

Kondicionálás: kötelező technológiai folyamat az iszapkezelésben. Az iszap kondicionálása ugyanakkor a kezelés különböző szakaszaiban megtörténhet. Célja lehet az iszapban lévő patogének elpusztítása, illetve számuk csökkentése, a szervesanyag stabilizálásával az iszap rothadóképességének megszüntetése és az iszap szárazanyag-tartalmának növelése. Ezáltal az iszap mezőgazdasági vagy energetikai célokra felhasználhatóvá válik. A kondicionálás történhet fizikai és kémiai úton (Tamás 1998, Barótfi 2005). Fizikai kondicionálás során az iszap kezelése többnyire hőközléssel történik. A fizikai kondicionálás módjai a termikus kondicionálás, illetve a mosatás (Tamás 1998, Barótfi 2005). A kémiai kondicionálás vegyszerek adagolásával történik, melyek hatására a negatív töltésű kolloid részecskék semleges töltésűvé válnak, ezért hidráburkuk lecsökken, az iszap könnyebben vízteleníthető lesz. Szerves és szervetlen vegyszereket is alkalmazhatnak. A szerves vegyszerek polielektrolitok. Alkalmazott szervetlen vegyszerek: vas(II)-szulfát, vas(III)-klorid, alumínium-klorid, alumínium-szulfát, kalcium-hidroxid (mésztej). A mész adagolása (beoltása) hőhatással jár, valamint a kémhatást is beállítja, ezáltal fertőtleníti és az iszap további rothadását megakadályozza. A mész kondicionálószerként való alkalmazása főként az iszap mezőgazdasági hasznosítása esetén előnyös: a nagy pH savanyú talajokra nézve kedvező hatású lehet. (Barótfi 2005)

További víztelenítés: a kondicionált iszap további nedvességtartalmának csökkentésére szolgál. Történhet természetes vagy mesterséges módon. Ez a technológiai folyamat szintén kötelező (Kovács 2003). A víztelenítés természetes módja az iszapszikkasztó ágyakon, szárító lagúnákban/tavakban mehet végbe, illetve léteznek már szolár szárítók is (Barótfi 2005). A mesterséges víztelenítés gépi úton történik. Az iszap szárítása, égetése, szállítása vagy elhelyezése előtt kerül rá sor. Használhatnak centrifugát, szalagszűrő préseket, kamrás szűrőprést, vákuumszűrőt, vákuumágys iszapvíztelenítőt. A mai iszapkezelési gyakorlatban a mesterséges víztelenítési technológiai megoldások gyakoribbak, mint a természetes víztelenítési eljárások (Tamás 1998, Barótfi 2005). A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen a szennyvíziszap víztelenítése iszapvíztelenítő centrifugákkal történik kb. 30-40%-os szárazanyag-tartalomig.

A következő lépések a további iszapkezelés során alternatívákat jelentenek.

Szárítás: további szárítását jelenti az iszapnak, amely szoláris vagy fosszilis energiával történhet. Előtérbe kerültek a szoláris energiával történő szárítási technológiák a fosszilis energiát felhasználó technológiákkal szemben (pl. Veszprémben). (Kovács 2003)

A szárítás az iszap víztartalmának csökkentését és patogének elpusztítását szolgálja. Hő hatására végbemenő folyamat. Az iszap szárítása különösen fontos annak mezőgazdasági felhasználása esetén, valamint ahhoz, hogy szállítása megoldható legyen. A szárítás az iszap víztelenítésnél és sűrítésnél több energiát igénylő kezelés. Az így elért víztartalom kisebb mint a víztelenítés és a sűrítés esetén, értéke mintegy 35%. A termikus iszapszárítás 300-500°C-os hőmérsékletet igényelhet. Végbemehet emeletes kemencében, forgó csökemencében, füstgáz szárítóban és szalagos szárítóban. Ezek a berendezések az iszap égetésére szintén használatosak. Legelterjedtebb az emeletes kemence és a forgó csökemence (Tamás 1998, Barótfi 2005).

Mezőgazdasági hasznosítás: víztelenítést követően a szennyvíziszap kijuttatható mezőgazdasági területre. Javasolható a szakaszos, prizmában történő tárolás utáni beszántásos elhelyezés szántóterületen (Csaba et al. 1978, Tamás 1998, Vermes 2005). Az 1. táblázatban a szennyvíziszap mezőgazdasági és hasznosítás nélküli elhelyezésének lehetőségeit foglalom össze.

1. táblázat: A szennyvíziszap mezőgazdasági és hasznosítás nélküli elhelyezésének lehetőségei

Hasznosítással egybekötött elhelyezés		Hasznosítás nélküli elhelyezés
Mezőgazdasági hasznosítás	Hasznosítás más módon	Folyékony formában iszaptároló medencékben
Folyékony iszap hasznosítás	Rekultivált területeken	Víztelenített formában területfeltöltésben
Víztelenített iszaphasznosítás		Víztelenített formában hulladéklerakó telepeken
Iszapkomposztként történő hasznosítás	Hasznosítás zöldövezetekben, parkokban, utak, vasutak mentén	Veszélyes hulladéklerakó telepeken egyéb toxikus hulladékokkal együtt
Granulátumként történő hasznosítás		

Forrás: Vermes (2005)

Marjiné Szerényi et al. (2006) tanulmányukban három iszapelhelyezési technológiát hasonlítanak össze komplex költség-haszon elemzések alapján. Kutatásuk szerint a legkedvezőbb megoldás a víztelenített iszap mezőgazdasági hasznosítása, majd a folyékony iszap injektálásos mezőgazdasági hasznosítása, végül pedig a víztelenített iszap deponálása. A szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának

és kezelésének szabályait az 50/2001.(IV.3.) és a 40/2008. (II. 26.) kormányrendeletek rögzítik. Ez utóbbi az 50/2001.(IV.3.) kormányrendelet módosításáról szól.

A szabályozás célja, hogy bizonyos szennyvizek, kezelt szennyvíziszapok és szennyvíziszap-komposztok mezőgazdasági területeken való szakszerű felhasználásával elkerülhetők legyenek a talajra, a felszíni és felszín alatti vizekre, valamint az ökoszisztémára gyakorolt káros hatások. A mezőgazdaságban biológiai, kémiai, illetve hőkezeléssel, tartós (legalább hat hónapig tartó) tárolással, vagy más kezeléssel (pl.: komposztálás) nyert iszapok hasznosíthatóak.

A szennyvíz és szennyvíziszap mezőgazdasági felhasználását megalapozó talajvédelmi terv és a szennyvíziszap-komposztok mezőgazdasági felhasználását megalapozó egyszerűsített talajvédelmi terv elkészítéséhez a tervezett terület talajának 27 paraméterét és talajvizének 18 paraméterét meg kell határozni. A mezőgazdasági felhasználás előtt a kijuttatandó szennyvíznek, illetve szennyvíziszapnak vagy szennyvíziszap-komposztoknak legalább 40 paraméterét (a 40/2008. kormányrendelet 1. és 2. melléklete tételesen felsorolja a paramétereket) szintén meg kell vizsgálni (Kardos és Juhos 2011).

A szennyvíziszap mezőgazdasági felhasználását az illetékes talajvédelmi hatóság engedélyezi, talajtani szakvélemény alapján. A talajtani szakvéleményben meghatározzák a felhasználás módját, a gyakoriságát, a felhasználható szennyvíziszap-mennyiséget, valamint a szennyvíziszappal kibocsátható tápanyag-, toxikus elem koncentrációját.

Nitrátérzékeny mezőgazdasági területen a szennyvíziszappal kijuttatott éves nitrogén-mennyiségnek 170 kg/ha alatt kell lennie. Amennyiben az érintett területen szerves trágyázás is történik, a szerves trágyával és szennyvíziszappal együttesen kijuttatott nitrogén-mennyiség is ezen érték alatt tartandó.

Mezőgazdasági területre csak azonnal felhasználható és bedolgozható szennyvíziszap-mennyiség szállítható ki, szennyvíziszap ott nem tárolható. A szennyvíziszapot a felszín alá kell juttatni. Amennyiben a felszínre juttatják ki, szikkadás után haladéktalanul be kell dolgozni.

Zöldszénővények és talajjal érintkező gyümölcsök termesztésére szolgáló területen tilos a szennyvíziszap felhasználása a termesztés évében és az azt megelőző évben. Csak vegetációs időn kívül lehet szennyvíziszapot hasznosítani szőlő és bogyógyümölcsök termesztése esetén, valamint alacsony törzsű gyümölcsültetvényeken. Magas törzsű gyümölcsfák esetén az iszap kijuttatása és a

betakarítás közt legalább hat hétnek kell eltelnie. Szántóföldeken szennyvíziszap csak a betakarítás és a következő vetés közti időszakban hasznosítható.

Szennyvíziszap nem juttatható ki fagyott, hóval borított, vízzel telített talajra. Folyékony szennyvíziszap felhasználása tilos 6%-nál nagyobb lejtésű területen. A víztelenített szennyvíziszap 12%-nál kisebb lejtésű területen felhasználható. Védett természeti területen, olyan területen, ahol ökológiai gazdálkodást folytatnak, réteken és legelőkön szennyvíziszap felhasználása tilos. Tilos továbbá szennyvíziszapot kijuttatni felszíni vizek külön meghatározott parti sávjában, vízjárta mezőgazdasági területeken, ivóvízbázisok védőterületén, bizonyos karsztos területeken (40/2008. (II. 26.) kormányrendelet).

Szennyvíziszapok hasznosításakor lakott területtől, lakóépülettől háromszáz méter védőtávolság tartandó. Szintén háromszáz méter védőtávolságot kell tartani, ha a terület, amin az iszap hasznosítása történik, érintkezik olyan területtel, ahol a szennyvíziszap mezőgazdasági felhasználása tilos.

Komposztálás: az iszapot komposztálhatják önállóan vagy mezőgazdasági hulladékkal (pl. kukoricaszár, szalma, tőzeg), települési szilárd hulladékkal és szerves, nem mérgező ipari hulladékkal (pl. élelmiszeripari, konzervgyári hulladék) együtt. A komposztálás során fertőtlenítés és szervesanyag átalakítás történik. Az iszap-komposzt, mint talajferő-utánpótló mezőgazdasági felhasználásra kerül. Javasolható a beszántásos elhelyezés szántóterületen vagy ültetvényben. Minden mezőgazdasági elhelyezés előtt az iszap összetételét, illetve a mezőgazdasági területet (talajtani, termelési szempontok) is meg kell vizsgálni. A komposztálás folyamatát döntően meghatározó tényezők a komposztálandó anyag szén- és nitrogéntartalma, minősége, valamint a levegőellátottsága, a nedvességtartalma, a hőmérséklete, az aprítottsága.

A komposztálás során az iszap térfogata, tömege nagymértékben csökken, a benne lévő nitrogén, foszfor, kálium, szén a mezőgazdaságban hasznosítható formájúvá alakul. A mezőgazdaságban való hasznosítás feltétele, hogy a komposzt megfelelő tápanyagtartalommal rendelkezzen és ne tartalmazzon jelentős mennyiségben káros anyagokat (pl. nehézfémeket). Erről legkönnyebben a komposztálandó anyagok ellenőrzésével, előzetes osztályozásával lehet gondoskodni. A komposztálás végbemehet szakaszos prizmákban vagy folyamatosan működő függőleges, illetve vízszintes, álló vagy forgó reaktorokban. A komposztálandó anyagot tartalmazó reaktorba oltókomposztot adagolnak. A Kneer-eljárást főként szennyvíziszapok komposztálására fejlesztették ki. Az iszaphoz tőzeget, előkezelt szerves kommunális

hulladékot, mezőgazdasági szilárd hulladékot adhatnak. A folyamat hengeres, vertikális reaktorban zajlik. A reaktor tartalmának keverése, homogenizálása a reaktorban lévő csiga segítségével történik. A reaktor alsó részén levegőt vezetnek be. A reaktorban való tartózkodási idő 2-3 hét (Tamás 1998, Barótfi 2005, Vermes 2005).

Égetés: a szennyvíziszapok égetésére akkor kerülhet sor, ha a mezőgazdasági hasznosítást az iszap összetétele nem teszi lehetővé. Ezt megelőzően az iszap kondicionálása, víztelenítése, szárítása mindenképpen szükséges. Az égetés feltétele az iszap 50% alatti víztartalma és 60% alatti szervesanyag tartalma (Tamás 1998). A nagy víz- és szervesanyag-tartalom miatt póttüzelőanyagot adnak hozzá, így az iszapot települési hulladékkal és ipari hulladékokkal együtt égetik. Az égetés során az iszap térfogata jelentősen lecsökken, a keletkezett termék patogéneket nem tartalmaz, valamint a biológiai bontásnak ellenálló szervesanyagok is megsemmisülnek. További előny a hasznosítható hőenergia felszabadulása. Az égetés kis telepeken meglehetősen nagy költségekkel jár, ehhez a légszennyezés megakadályozása is hozzájárul. Az égetés végbemehet emeletes kemencében, forgó csőkemencében vagy fluidizációs kemencében. (Tamás 1998)

Deponálás: az iszap hulladéklerakóban történő elhelyezése. 2008-as adatok alapján hazánkban még mindig jelentős mennyiségű szennyvíziszapot helyeznek hulladéklerakóra, a deponálás aránya 25% (OHT – KvVM 2008).

2.3. Az anaerob lebontás általános jellemzése

2.3.1. Az anaerob lebontás rövid története

Írásos bizonyítékok utalnak, arra hogy Asszíriában biogázt használtak fel fürdővíz melegítésére már az időszámításunk előtti X. században, illetve az időszámítás előtti XVI. században Perzsiában is (Lusk 1998).

Jean Baptiste van Helmont (1577-1644) flamand orvos felfedezte, hogy gyúlékony gáz nyerhető bomló szervesanyagokból, bár az „életerő” (vis vitalis) elvén gondolkodott és a vizet tekintette őselemnek, de a gázok és gőzök között helyesen tett különbséget. Tőle származik a fermentum kifejezés is, amelyet az erjedés folyamatánál használt annak indoklására (Balázs 1996).

A mocsarakban anaerob körülmények között képződött mocsárgáz öngyulladását régóta ismerte az emberiség. Elsőként Benjamin Franklin (1706-1790) 1764-ban írta le, hogy képes volt világítani a sekély, nagy felületű, iszapos tóból feltörő gázzal New Jerseyben. Megfigyeléseit megírta Joseph Priestly-nek (1733-1804), aki szennyezett

metánt elő is tudott állítani alkohol gőzökön átűtített elektromos szikra segítségével. A „gyúlékony levegővel” végzett kísérleteinek eredményeit 1790-ben jelentette meg (Titjen 1975).

Alessandro Volta (1745-1827) volt az első tudós, aki tudományosan ismertette a „gyúlékony gázok” képződését alacsony hőmérsékleten mocsarakban és tavak üledékében. Metán-levegő gázelegy robbanási kísérletei során megállapította, hogy a gázelegy szén-dioxiddá ég el. 1776-ban kimondta, hogy összefüggés van a bomló (szerves) anyag és a képződött gáz mennyisége között (Balázs 1996). Felfedezéseinek fontosságára felfigyelt az akkori tudományos világ, ezt mutatja, hogy két éven belül németre is lefordították művét. A metán elemi összetételét 1786-ban Claude Louis Berthollet (1748-1822) állapította meg, míg helyes képletét 1804-ben John Dalton (1766-1844) adta meg (Balázs 1996).

Az előzőekkel párhuzamosan a bányászat során megjelenő veszélyes gáz vizsgálata is megkezdődött, bár hosszú évekig nem ismerték fel a kapcsolatot a mocsarakban keletkező gáz és a bányászat során tapasztalt gáz között. A bányák mélyén a szénrétegek közül előszivárgó, robbanásveszélyes gázt is régóta ismerték ugyan, de csak 1618-ban Jean Tardin vizsgálta először, aki csupán arra a következtetésre jutott, hogy a szénhez és az olajhoz hasonlóképpen égethető el. 1667-ben jelent meg az első tudományos értekezés a „bányagázzal” Thomas Shirley (1638-1678) által, amelyet a Royal Societynek küldött el (Balázs 1996). A „bányagáz” tényleges tudományos felismerésére még várni kellett. A bányászok életére törő bányalég (sújtólég) elhárításának kérdése számos tudósnak adott feladatot, így nyílt lehetőség a metán tartalmú gáz megismerésére. Sir Humphry Davy (1778-1829) 1815-1816 között három lámpát is szerkesztett a sújtólégrobbanás elhárítása érdekében. Vizsgálatai során bányákból származó gázminta elegyek robbanási sajátosságait tisztázta, valamint felismerte az égés harmadik feltételét, a megfelelő gyulladási hőmérsékletet is. Először azonosította a metánt, majd meghatározta a tiszta metán gyulladási hőmérsékletét, majd pedig a metán-levegő gázelegy gyulladási és robbanási körülményeit is tisztázta. 1808-ban kimondta, hogy metán tartalmú az a gáz is, amely állati trágya bomlása során keletkezik (Balázs 1996). A mocsárgáz és a bányalég vizsgálatok együttesen vezettek el a metángáz teljesebb megismeréséhez, így nyitva utat a későbbi felhasználásához is. A metán tudományos felfedezése után szinte azonnal a felhasználásával kezdtek el foglalkozni.

A hulladékokból történő metán előállítását és felhasználást először Indiban alkalmazták. Az első rothasztó telep 1859-ben Bombayben (India) egy lepratelepen épült (Meynell 1976), míg Európában 1895-ben Exeterben (Anglia) létesült az első anaerob fermentor, amely egy szennyvíztisztító telep szennyvíziszapjából állított elő biogázt, amelyet az utcai lámpák világítására használtak fel (Wellinger 1999). 1937-ben pedig már 7 német nagyvárosban biogázzal üzemeltetett hulladékgyűjtő járművek működtek.

Louis Pasteur (1822-1895) francia mikrobiológus kísérletileg igazolta, hogy a metánt mikroorganizmusok állítják elő. Gayon, Pasteur tanítványa, 1883-1884 között állati trágyával végzett kísérletei alapján megállapította, hogy a 35°C-os rothasztás eredményeképpen összegyűjtött gáz mennyisége nagyobb, mint a Pasteur által feltételezett, szobahőmérsékletű állati trágya rothasztása során várható gázmennyiség. 1888-ban Gayon a Francia Tudományos Társaság ülésén már olyan gázt égetett el, amelyet 35°C-on saját maga állított elő vízből és trágyából. Kísérleteire alapozva javaslatot tett melegítésre és világításra történő felhasználására, úgy gondolta, hogy a képződött gázzal oldják meg Párizs közvilágítását. A korabeli Le Figaro-ban igen éles gúnnnyal illették Gayon javaslatát a lótrágyából előállított elektromos áramra vonatkozóan (Titjen 1975). A Gayon által javasolt célt nem valósították meg, de megjegyezendő, hogy a kutatásai felhívták a figyelmet a rothasztás körülményeinek fontosságára és ezen körülmények tisztázására további kutatások kezdődtek.

A hőmérséklet szerepét a biogáz képződésre először Popoff (1875) írta le. Üledékek vizsgálata során úgy találta, hogy akár 6°C alatt megkezdődik a biogáz képződés. Az 50°C-ig történő hőmérséklet emelkedés stimulálja a gáztermelést (Wellinger 1999). A nagyobb rothasztási hőmérséklet biztosítása érdekében folytatott (1914-1921 közötti) kísérleti munka alapján Imhoff (1876-1965) és Blunk korrózióálló, kettős falú, forró vízzel, vagy gőzzel töltött hőcserélőt javasolt az ipari méretű biogáz fermentorok kivitelezésekor (Imhoff-tartály). Az első folyamatosan fűtött rothasztó torony 1926-ban Essenben kezdte meg működését (Roediger 1955), amely áttörést jelentett a nagyobb hőmérsékletű, ipari méretű rothasztás történetében. Az első, kizárólag szilárd mezőgazdasági hulladékot rothasztó torony pedig 1938-ban kezdte meg működését Algériában Ducellier és Isman irányításával. A II. világháború alatt az üzemanyag problémák enyhítése érdekében felértékelődött a szennyvíziszap, illetve a hígtrágya és víztelenített trágya alapú biogáz rothasztás. A folyamatot erősítette, hogy

már 1936-ban Buswell kísérleti tapasztalatai alapján javasolta a trágyák és egyéb szerves hulladékok együtt rothasztását (Buswell és Hatfield 1937). Kísérleti tapasztalatai és rothasztási javaslatai alapján a világon Buswellt tartják az együttrothasztás atyjának (koszubsztrát hatás) (Wellinger 1999). Európában igen jó eredményeket értek el az anaerob fermentációval mind a települési, mind pedig a termelési (akár az ipari, akár a mezőgazdasági) hulladékok kezelése területén.

Jelenleg legelterjedtebbek a kis, akár farmergazdaságokat ellátó biogáz fermentorok. Egyes becslések szerint jelenleg a világon több mint 9 millió biogáz fermentor működik, amelynek 80%-a Kínában található. Megjegyzendő, hogy ezek a néhány köbméteres „családi szintű” fermentorok kis hatékonysággal állítják elő a főzésre, világításra szánt energiát (Somosné Nagy 2010).

Hazánkban a XX. század első felében kezdődtek meg a kutatások és az első hazai próbatelepek is ekkor kezdték meg a termelésüket. A biogáz termelés és az ebből előállított villamos energiatermelés Magyarországon az elmúlt évekig elsősorban szennyvíztisztító telepekhez volt köthető. 2003 előtt hazánkban nem volt mezőgazdasági biogáz telep. A hulladéklerakók közül pedig csak 14 telepen történt depóniagáz kinyerés mintegy évi 100-120 millió m³ mennyiségben, amelynek jelenleg is csak töredékét hasznosítják. Magyarországon megfelelőek a biomassa anaerob fermentációjának adottságai, ennek ellenére a biogáz üzemek építése, üzemeltetése sok problémával jellemezhető. Az elmúlt évek ösztönzéseinek eredményeképpen 2010 nyaráig hazánkban 10 mezőgazdasági biogáz telep kezdte meg működését (Nyírbátor, Pálhalma, Kenderes-Bánhalma, Kaposvár, Klárafalva, Kecskemét, Csengersima, Dömsöd, Kapuvár, Kaposszekcső). Jelenleg további negyven üzem áll tervezés, illetve kivitelezés alatt. Az Európai Unió területén évente 22 millió MWh villamos áramot termelnek biogáz által és e közben 1,3 milliárd tonna hulladékot ártalmatlanítanak. Németországban a biogáz telepek száma meghaladja a hatezret. (Somosné Nagy 2010)

2.3.2. Az anaerob lebontási folyamat

Az anaerob lebontási folyamat több részfolyamatból áll. Számos szerző foglalkozott az anaerob lebontás folyamatainak megismerésével. Kezdetben két, három, majd négy részre osztották. Lawrance és McCarty (1969) három részfolyamattal – hidrolízis, savtermelés és metánermelés – jellemzi az anaerob lebontást. Megjegyezték, hogy a gyakorlatban azonban csak két részfolyamattal, a savas és a metános folyamatokkal kell foglalkozni, mert a hidrolízist szintén a savtermelő baktériumok

végzik. Az anaerob lebontási folyamat első lépése Malina és Pohland (1992) szerint is a hidrolízis, ezt követi a savtermelés, majd a metántermelés. A modern szakirodalmak (Siegrist et al. 1993, Mata-Alvarez 2003, Öllös et al. 2010) már komplex anaerob lebontási folyamatként, négy részfolyamat együtteseként kezelik az anaerob lebontást, amelyek a következők: hidrolízis, savképzés, ecetsavképzés, metánképzés (6. ábra).

A mindennapi gyakorlatban és a könnyebb áttekinthetőség érdekében az anaerob rothasztást még mindig két nagy részre, lépcsőre oszthatjuk:

Az első lépcső a hidrolitikus folyamatok (nem-metántermelő folyamatok), amikor a mikroorganizmusok heterogén csoportjai az iszapban lévő fehérjéket, szénhidrátokat és zsírokat monomerjeikre bontják és rövid szénláncú zsírsavakká vagy alkohollá alakítják. A lebontás eredményeképpen hidrogén és szén-dioxid gáz is képződik (Ramalho 1977).

A második (metántermelő) lépcsőben az előző folyamatokban termelt anyagcseretermékeket a szigorúan obligát anaerob (metántermelő) baktériumok metánná és szén-dioxiddá alakítják.

A következőkben röviden bemutatom a 4 elméleti fázisra bontott anaerob fermentáció lépéseit.

A hidrolízis fázisában (1. fázis) a makromolekulákat (polimerek) a sejten kívüli (extracelluláris) enzimek egyszerű szerves vegyületekké (monomerekké) alakítják, hidrolizálják. A hidrolízis szerepe alapvető, hiszen e folyamat nélkül a szilárd szervesanyagok lebontása nem válna lehetővé. A hidrolízis eredményeképpen a már oldott szervesanyagok a sejtfalon átdiffundálhatnak és így kapcsolódnak be a sejtekben lejátszódó lebontási folyamatokba.

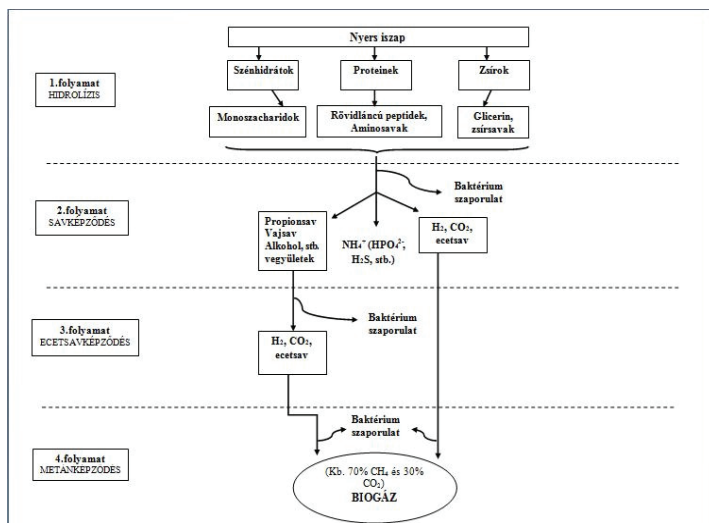
A sejtekbe diffúzióval bejutott hidrolízis termékek a savképződés fázisában (2. fázis), a mikroorganizmusok anyagcsere-folyamatainak köszönhetően, hidrogén-, szén-dioxid-gázzá, illékony szerves vegyületekké (hangyasav, ecetsav, propionsav, vajsav), illetve alkohollá, ammóniává, hidrogén-szulfiddá alakulnak. A keletkezett karbonsavak az ecetsavképződés fázisában ecetsavvá alakulnak (3. fázis), amelyeket a metántermelő-baktériumok már közvetlenül képesek metánná alakítani.

A metántermelő baktériumok a savképződés fázisaiban képződött termékek közül elsősorban az ecetsavat, a hidrogént, a szén-dioxidot képesek közvetlenül metánná alakítani (4. fázis). A fermentáló baktériumok és a metántermelő-baktériumok közötti anyagforgalom több mint 70%-a az ecetsavképződésen keresztül valósul meg.

A metánképződés fázisában az ecetsavból, a hidrogénből és szén-dioxidból metán képződik. Egyrészt a savas fermentáció folyamán keletkezett savak metánná és szén-dioxiddá alakulnak, másrészt ezzel egy időben a szén-dioxid hidrogén akceptor szerepét is betölti és metánná redukálódik az alábbi egyenlet szerint:



Az egyes szakaszok a különböző baktériumcsoportok kooperatív anyagcsere-teljesítményéből adódnak. A savképzés fázisában élő fakultatív anaerob baktériumok a szubsztrátok vonatkozásában igen változatosak és szélsőséges környezeti körülmények között is aktívak. Ezzel szemben a metanogén baktériumok szubsztrát-spektruma rendkívül szűk. (Buswell 1958, Bai 2005, Bai 2007)



6. ábra: Az anaerob szervesanyag lebontás anyagcsere-folyamatai (Siegrist (1993)) alapján saját szerkesztés)

Az előzőekben összefoglalt fermentációs folyamatokat a következőkben részletesebben is bemutatom, kiemelt helyen kezelve a hidrolízis folyamatait, hiszen az enzimaktivitás vizsgálatokkal ezen folyamatok nyomon követhetőségét kívántam vizsgálni.

2.3.2.1. A hidrolízis

A hidrolízis (amely a fermentáció első lépése, de sokszor nem tekinthető önálló fázisnak) során a savtermelő baktériumok extracelluláris enzimjeinek hatására a szilárd iszapban lévő makromolekulák (fehérjék, szénhidrátok, zsírok, cellulóz, lignin) egyszerű szénhidrátokká, aminosavakká, zsírsavakká, glicerinné alakulnak. Az enzimek mind a szervesanyag lebontásában, mind pedig a felépítő folyamatokban részt vesznek (Hattingh et al. 1967, Thiel et al. 1968). A hidrolitikus enzimek (proteáz, cellobiáz, amiláz, foszfatáz) a hidrolízis folyamatába kapcsolódnak be. Gerardi (2003) kutatása szerint a baktériumok által termelt enzimeknek meghatározó szerepe van a hidrolízis folyamatában. A baktériumok által termelt enzimek a sejtmembránon keresztül (exoenzimek) kijutnak és a sejtfalra adszorbeálódott szerves vegyületeket hidrolizálják, oldott formává alakítják, amelyek így már képesek bejutni a sejtek belsejébe (Bai 2007). A sejtbe bejutott vegyületek további bontásában már a sejten belüli (endoenzimek) enzimek vesznek részt. Exoenzimet nem minden baktérium termel, de endoenzimet igen. (Johnson 1978a, Johnson 1978b, Davidson 1978, Szabó 1989, Öllös et al. 2010)

Az előzőek értelmében a hidrolízis lépése meghatározó jelentőségű az anaerob lebontás, így a metántermelés folyamatában, ugyanis a szubsztrát bonthatósága és lebontási sebessége az enzimaktivitás függvénye és ez a biogázzá alakulás feltétele (Szabó 1989, Bai 2007). Az enzimaktivitás méréssel a rothasztóban lejátszódó hidrolízis folyamatát tehát jellemezni lehet (Thiel et al. 1968). Az enzimaktivitást meghatározza a szennyvíziszap összetétele, a terhelés mértéke, a mikrobiológiai populáció természete, valamint a környezeti tényezők (hőmérséklet, pH, lúgosság stb.). Különösen fontos a hidrolízist végző enzimek (proteáz, lipáz, cellobiáz, amiláz, foszfatáz) szerepe az anaerob rothasztásban, mivel ezek a makromolekulákat kisebb egységekre bontják, amelyek azután behatolnak a sejtek belsejébe, ahol további lebomlást szenvednek vagy a sejtanyag építőkövéül szolgálnak (Heukelekain 1958, Bai 2007, Öllös et al. 2010).

Bizonyos esetekben, nagy cellulóz vagy lignin tartalmú szennyvíziszapok vagy szennyvizek anaerob lebontása esetén a hidrolízis folyamata igen lassú lehet. Ha a könnyen bomló szervesanyagok (zsírok, fehérjék) koncentrációja nagy, a hidrolízishez szükséges idő rövidül, ugyanakkor a nagyobb koncentrációban képződő illósav akadályozhatja a metántermelő baktériumok elszaporodását (Öllös et al. 2010).

A szubsztrát fajlagos felületének megnövelése jelentősen fokozhatja a biológiai lebontás sebességét, hatásfokát. A hidrolízis folyamata (és a savtermelés is) 4,0-5,5 pH

között igen intenzív, majd 6,0 körüli értéken lelassul. A hőmérséklet a hidrolízis sebességét az Arrhenius összefüggésnek megfelelően befolyásolja. (Ramalho 1977)

2.3.2.2. A savképzés

A hidrolizáló baktériumok által nem hasznosított aminosavakat, peptideket, mono- és oligoszacharidokat és a nagy mennyiségben jelenlévő nagy szénatomszámú zsírsavakat a savképzés folyamatában részvevő mikroorganizmusok kisebb vegyületekké alakítják. Ekkor jelennek meg a kis szénatomszámú zsírsavak, úgymint az ecetsav, a propionsav, a vajsav, valamint egyéb vegyületek (hidrogén, szén-dioxid, kénhidrogén, ammónium-vegyületek, illetve alkoholok). A savképzés ezen folyamatát a jelentős karbonsav termelés miatt acidogenezisnek is szokták hívni. (Buswell és Hatfield 1937, Benefield és Randall 1980, Szabó 1989)

2.3.2.3. Az ecetsavképzés

Az ecetsavképződés folyamatában a savképződés lépésében keletkező karbonsavakat az acetogén mikroorganizmusok ecetsavvá, illetve acetáttá (ecetsav sója) és hidrogéngázzá alakítják. A lebontás során nagy mennyiségű ecetsav képződik, így ezt a lépcsőt acetogenezisnek is hívják. A természetes úton képződő metán mennyiségének több mint 70%-a acetátból képződik (Schroeder 1977). Az acetogén baktériumok igen sokfélék és a környezeti hatásokra viszonylag toleránsak. Ez azzal magyarázható, hogy különböző összetételű tápanyagokat tudnak hasznosítani életfolyamataikhoz, így növelve túlélési esélyeiket. Az acetogének anyagcsere folyamatainak eredményeképpen megjelenő hidrogéngáz, amely a következő lépcsőben kizárólagos szerepet játszó mikroorganizmusok részére (metanogének) redukálószer, meghatározó jelentőségű. Megállapítható, hogy az acetogén mikroorganizmusok fontos szerepet töltenek be a rendszer redoxipotenciálja szempontjából is. Ugyanakkor az acetogének is függnek a metanogénektől, hiszen ha a metanogének nem fogyasztják el megfelelő sebességgel a képződött hidrogént, akkor a növekvő hidrogéngáz koncentráció már gátló hatást fejt ki az acetogének működésére (Buswell és Hatfield 1937, Benefield és Randall 1980, Szabó 1989). A megfelelő biogáz termelés (üzemeltetés) szempontjából a két mikrobaközösség közötti együttműködés elengedhetetlen.

2.3.2.4. A metánképzés

A negyedik fázisban, szigorúan anaerob körülmények között lejátszódó folyamatok összességét metanogenezisnek is hívják. A folyamat eredménye a metán és a szén-dioxid tartalmú biogáz. Néhány metanogén baktérium a hidrogént a korábban képződött szén-dioxid redukálására tudja fordítani, míg a többség az ecetsavat (acetátot) alakítja át metánná és szén-dioxiddá. A szén-dioxid és hidrogén közötti reakció kritikus az anaerob rothasztás egészét illetően, hiszen ez a folyamat távolítja el a hidrogéngázt a közegből, így biztosítva az acetát termeléséhez szükséges hidrogéngáz kis parciális nyomását. A növekvő hidrogéngáz koncentráció esetén a fermentáló mikroorganizmusok az acetát helyett más karbonsavakat termelnek és az utóbbiak acetogén mikroorganizmusokkal történő átalakítása ecetsavvá végül is leáll. Mivel a metántermelés elsődleges folyamata az acetát átalakítása, az acetát csökkenése a biogáz termelés csökkenését eredményezi. (Heukelekain 1958, Schroeder 1977, Szabó 1989)

A metanogén mikroorganizmusok a baktériumok *Archaea* doménéhez tartoznak, s jelentős különbségeket mutatnak a többi baktériumhoz képest. A biogáz termelés szempontjából meghatározó tulajdonságuk, hogy lassan szaporodnak és rendkívül érzékenyek a környezeti feltételek változásaira (pl.: az üzemeltetés során az 1-2°C-os hőingadozás is gondot jelenthet). A metanogének aktivitásának jelentős csökkenése azt eredményezi, hogy a sav-, illetve az ecetsavtermelés során képződő karbonsavak koncentrációja megnő, amely a rendszer kémhatásának drasztikus csökkenésével a biogáztermelés leállításához vezethet. A csökkenő kémhatás tovább rontja a metanogének életfeltételeit. A fentiek értelmében az üzemeltetés fontos feladata a metanogén baktériumok életfeltételeinek megfelelő, állandó szinten tartása. (Schroeder 1977, Johnson 1978, Benefield és Randall 1980, Szabó 1989, Öllös et al. 2010)

2.3.3. Az anaerob rothasztók metántermelő mikrobaközösségének jellemzése

A számtalan rothasztási technológia és a fermentorba adagolt szubsztrát miatt minden reaktor többé-kevésbé egyedi mikrobaközösséggel jellemezhető. Napjainkra egyre nagyobb szerepet kap az anaerob rothasztók mikrobiológiai jellemzése. Az anaerob rendszerek klasszikus tenyésztéssel történő vizsgálata nagyon körülményes, ezért helyette molekuláris és kemotaxonomiai módszerek terjedtek el (Öllös et al. 2010). A 2. táblázatban *Archaea* (ösbaktériumok), míg a 3. táblázatban a *Bacteria*

(valódi baktériumok) összetételét Tauber et al. (2007) és jellemzésüket Bitton (2005) és Öllös et al. (2010) alapján ismertetem.

2. táblázat: A mezofil és a termofil félüzemi rothasztók mikrobaközösségeinek *Archaea* összetétele és jellemzésük

Mezofil rendszer		Termofil rendszer	
Név	Jellemzés	Név	Jellemzés
<i>Methanosaeta</i> sp.	Széles körben elterjedtek, csak acetátot hasznosító gömb alakú mikrobák.	<i>Methanosarcina</i> sp.	Acetátot, metanolt, metil-amint, illetve szén-dioxidot, hidrogént hasznosítók.
<i>Methanoculleus</i> sp.	Hidrogént, szén-dioxidot, gyakran hangyasavat és ritkábban alkoholokat is hasznosító gömb alakú mikrobák.	<i>Methanothermobacter</i> sp.	Hidrogént, széndioxidot, néha hangyasavat és alkoholokat hasznosítanak.
<i>Methanosarcina</i> sp.	Acetátot, metanolt, metil-amint, illetve szén-dioxidot, hidrogént hasznosítók.		

Forrás: Bitton (2005), Tauber et al. (2007), Öllös et al. (2010)

3. táblázat: A mezofil és a termofil félüzemi rothasztók mikrobaközösségeinek *Bacteria* összetétele és jellemzésük

Mezofil rendszer		Termofil rendszer	
Név	Jellemzés	Név	Jellemzés
<i>Acidovorax</i> sp.	Fakultatív hidrogénfogyasztó, kemolitotróf baktériumok, amelyeknek szerepe van a xenobiotikumok lebontásában.	<i>Thermotogaceae</i> sp.	A pálcá alakú baktériumok egyszerű és összetett szénhidrátok hasznosítására is képesek.
<i>Nostocoida</i> sp.	Képes hasznosítani többek között az acetátot, piruvátot, propionátot, glükózt, fruktózt, mannózt, laktózt, glicerint.	<i>Coprothermobacter</i> sp.	Mérsékelt termofil baktérium, fehérjékben gazdag szennyvízzel táplált mezofil rothasztókból izolálták. Zselatint, kazeint hasznosít.
<i>Smithella</i> sp.	Szigorúan anaerob, elsősorban propionátot, butírárt hasznosítók.	<i>Bacteroidetes</i> sp.	Széles körben elterjedt csoport.
<i>Bacteroidetes</i> sp.	A leginkább elterjedt az anaerob rothasztókban.		
<i>Chloroflexi</i> sp.	Változatos szervesanyag hasznosítás jellemzi.		

Forrás: Bitton (2005), Tauber et al. (2007), Öllös et al. (2010)

Tauber et al. (2007) a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen egy mezofil és egy termofil félüzemi reaktor mikrobaközösségét T-RFLP (terminális restrikciós fragmens hossz-polimorfizmus) módszerrel vizsgálták. Megállapították, hogy a mezofil közösség fajgazdagabb és dominanciaviszonyai kiegyenlítettebbek. Ez hozzájárulhat ahhoz, hogy a mezofil rendszer az üzemeltetési paraméterek megváltozására rugalmasabban reagálhat, illetve a megváltozott körülményekhez az adaptálódása gyorsabban fog végbemenni.

2.3.4. Az anaerob fermentáció körülményei

A lebontási folyamat bemutatott lépései egy tökéletesen kevert reaktorban egymással egy időben, párhuzamosan mennek végbe, ezért nincs olyan paraméter, amely egymagában alkalmas lenne a teljes folyamat ellenőrzésére. Az üzemi körülmények változásának megfelelően előfordul, hogy alkalmanként az egyensúly megbomlik és ennek következtében a fermentációs savtermelés vagy a metántermelés kerül előtérbe. Az üzemeltetés feladata, hogy e két baktérium populáció kényes egyensúlyát biztosítsa. Az ehhez szükséges információkat az enzimaktivitás mérésekkel (dehidrogenáz, proteáz, lipáz enzimaktivitás mérések) kiegészült klasszikus ellenőrző paraméterek biztosíthatják.

Az anaerob lebontás körülményeit számos tényező határozza meg, többek között a hőmérséklet, a kémhatás, a szubsztrát minősége és összetétele, a fajlagos szervesanya terhelés, a toxikus anyagok.

2.3.4.1. A hőmérséklet

A metántermelés hőmérsékletfüggésének vizsgálata a régmúltra tekint vissza. A metántermelés 0°C felett megkezdődik (pszichrofil tartomány 0-25°C között), majd a hőmérséklet emelésével összhangban növekszik. Számos szerző vizsgálta a hőmérséklet szerepét az anaerob lebontásban, akik a metántermelés optimális hőmérsékletének a 35-40°C közötti (mezofil) tartományt javasolták (Fair és Moore 1934, Goulecke 1958, Hills és Schroeder 1969), illetve drasztikus gáztermelés visszaeséséről számoltak be 42°C felett (Fair és Moore 1934, Hills és Schroeder 1969). Ma már tudjuk, hogy nem egy, hanem két optimális hőmérsékleti tartományról beszélhetünk (Malina és Pohland 1992). A második, termofilnak nevezett hőmérsékleti tartomány optimuma 55°C körül van. Mezofil hőmérsékleti tartományról 25-45°C között, míg termofil hőmérsékleti tartományról 45-60°C között beszélhetünk. 60°C felett drasztikusan lecsökken, míg

70°C felett szinte megszűnik a gáztermelés, erről számolnak be Malina és Pohland (1992) összefoglaló munkájukban. A mindennapi gyakorlatban gazdaságossági szempontokat figyelembe véve a 35°C (mezofil) és az 55°C (termofil) hőmérsékletű lebontás terjedt el.

Az iszapkezelés gyakorlatában még mindig elsősorban a mezofil hőmérsékletű fermentáció a gyakoribb, pedig a termofil hőmérsékletű fermentációnak megvan a létjogosultsága: nagyobb lebontási határfok, ezért nagyobb gázkihozatal és kisebb tartózkodási idő, valamint kisebb iszapmaradék jellemzi, és lényegesen jobb a patogének termikus inaktiválása is (Rimkus 1982).

A mezofil és a termofil hőmérsékletű anaerob fermentációt hasonlítottam össze üzemelési és üzemellenőrzési paraméterek alapján a 4. táblázatban, míg az előnyeiket és a hátrányaikat a 5. és a 6. táblázatban foglaltam össze. A mezofil és a termofil rendszerek összehasonlítását tartalmazó táblázatokat (4-6. táblázat) számos szerző felüzeni és üzemi kísérleti adatai alapján állítottam össze.

4. táblázat: A mezofil és a termofil hőmérsékletű rendszerek összehasonlítása üzemelési és üzemellenőrzési paraméterek alapján

Paraméter	Mezofil rendszer	Termofil rendszer
Hőmérsékleti optimum (°C)	35 – 40	55 – 60
pH	7,2 – 8,0	7,2 – 8,5
Hőmérsékletingadozás, amelyet a rendszer elvisel (°C)	3 – 5	1 – 2
Hidraulikus tartózkodási idő (d)	15 – 25	3 – 10
Elérhető KOI csökkenés (%)	65 – 85	85 – 95
Elérhető BOI ₅ csökkenés (%)	60 – 80	80 – 90
Elérhető szervesanyag csökkenés (%)	45 – 55	55 – 70
Biogáz kihozatal (Nm ³ /1000 kg száraz szervesa.)	920 – 980	950 – 1000
Biogáz metántartalma (%)	60 – 70	70 – 85
Illósav (mgCH ₃ COOH/dm ³)	1500 – 2500	3000 – 4000
Lúgosság (mgCaCO ₃ /dm ³)	4000 – 6000	3000 – 5000
Redoxipotenciál (mV)	-450 – -550	-560 – -600
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	0,6 – 1,6 (kis terhelés) 2,4 – 6,4 (nagy terhelés)	3,0 – 8,0 (kis terhelés) 8,0 – 30,0 (nagy terhelés)

Forrás: Ahring 1994, Aitken et al. 1992, Garber 1982, Iranpour et al. 2002, Moen et al. 2003, Nielsen 1999, Nielsen és Peterson 2001, Rimkus et al. 1982, Zábránská et al. 2000a, 2000b, 2002

A 4. táblázatból kitűnik, hogy az üzemellenőrzési paraméterek csoportjából a szakirodalomban teljesen hiányoznak az enzimaktivitás mérések eredményei.

5. táblázat: A mezofil és a termofil rendszer előnyei

Mezofil rendszer (a stabilizálatlan iszaphoz hasonlítva)	Termofil rendszer (a mezofil rendszerhez hasonlítva)
Stabilizálódik a szervesanyag, miközben biogáz képződik, kiirthadt iszap trágyaként hasznosítható	A nagyobb reakciósebesség miatt nagyobb a gázhozam, valamint nő a biogáz metán tartalma, kisebb tartózkodási idő
Csökken az iszap mennyisége	Kisebb reaktortérfogat szükséges
Csökken az iszap fertőző képessége	Nagyobb fokú a patogének pusztulása
Javul az iszap vízleadó képessége	Az iszap vízteleníthetősége tovább javul
A rothasztó berendezés az iszapkezelés (tárolás) szempontjából „iszappufferoló” egység	A reaktorban a habképződés csökken

Forrás: Ahning 1994, Aitken et al. 1992, Garber 1982, Iranpour et al. 2002, Moen et al. 2003, Nielsen 1999, Nielsen és Peterson 2001, Rimkus et al. 1982, Zábránská et al. 2000a, 2000b, 2002

6. táblázat: A mezofil és a termofil rendszer hátrányai

Mezofil rendszer (a stabilizálatlan iszaphoz hasonlítva)	Termofil rendszer (a mezofil rendszerhez hasonlítva)
Nagy tartózkodási idő miatt nagy reaktor térfogat szükséges, amely nagy beruházás költséggű	Nagyobb fűtési energia szükséglet
A nagyfokú hidrolízis miatt romlik az iszapvíz minősége	Tovább romlik az iszapvíz minősége
Nehézfémek gátló hatása a lebontásra	Érzékenyebb a toxikus nehézfémekre
	Érzékenyebb a hirtelen hőmérséklet-változtatásokra (pontosabb hőmérséklet szabályozás szükséges)

Forrás: Ahning 1994, Aitken et al. 1992, Garber 1982, Iranpour et al. 2002, Moen et al. 2003, Nielsen 1999, Nielsen és Peterson 2001, Rimkus et al. 1982, Zábránská et al. 2000a, 2000b, 2002

Az előbbi összehasonlításból (5. és 6. táblázat) kiderül, hogy a termofil rendszer bizonyos hátrányai mellett a nagyobb napi gázmennyiség és azon belül a nagyobb metántartalom miatt előnyösebb, mint a mezofil rendszer. Ennek ellenére az egyszerűbb üzemeltetési körülmények és a gazdaságossági szempontok (a termofil üzemeltetés nagyobb költsége) miatt még mindig a mezofil rendszerek jellemzőbbek a rothasztás gyakorlatában.

2.3.4.2. Kémhatás

Minden baktériumfaj működésének megvan a saját optimális kémhatás intervalluma, amely a szaporodás és az anyagcsere folyamatok szempontjából a számukra legkedvezőbb. A rothasztó iszapjának optimális kémhatása a különböző fajok

optimális pH szükségletéből tevődik össze. Általánosságban megállapítható, hogy a rothasztókban megtalálható baktériumok a 7,2 – 8,5 pH-tartományban a legaktívabbak, ezért egy jól működő iszaprothasztóban ezzel a pH tartománnyal lehet találkozni. A kémhatásra ugyancsak a metanogének a legérzékenyebbek. Megfigyelések szerint 6 alatti, illetve 8,5 feletti pH esetén a metántermelés hirtelen lelassul. (Schroeder 1977, Öllös et al 2010)

2.3.4.3. A szubsztrát minősége, összetétele

A szubsztrát minősége és összetétele a legfontosabb tényezők közé tartozik, amelyek meghatározzák valamely anaerob rothasztó ökoszisztémáját, így a sikeres lebontást is.

Az anaerob iszapstabilizációhoz és a mikroorganizmusok szaporodásához az iszapnak megfelelő mennyiségben kell tartalmaznia szervesanyagokat, amelyek mikro- és makroelem-tartalmát, valamint energiatartalmát a mikroorganizmusok saját sejtanyagaik felépítésére, illetve szaporodásukhoz használhatják fel.

A kommunális és ipari szennyvizekben a szénhidrátok számos csoportja megtalálható, többek között: pentózok és hexózok, amelyek között ketózok és aldózok is előfordulhatnak. Az ipari szennyvizek viszonylag nagy mennyiségű poliszacharidot (pl.: keményítőt, cellulózt, pektineket) tartalmazhatnak. A szennyvíziszapokban ezért változó összetételben rendelkezésre állnak az alábbi vegyületcsoportok: mono-, di- és poliszacharidok, aminosavak, proteinek, zsírsavak, lipidek, alkoholok, valamint az élő sejtekből eredő egyéb nitrogéntartalmú vegyületek. A szubsztrát összetételén a legfontosabb szerves komponensek arányát értjük (Schroeder 1977, Öllös et al 2010). A 7. táblázatban foglaltam össze a különböző szervesanyagok elméleti biogáz potenciálját, azaz az egységnyi száraz anyagban kifejezett vegyületre vonatkozó várható biogáz kihozatalt.

7. táblázat: Különböző vegyületcsoportok elméleti biogáz potenciálja

Vegyületcsoport neve	Biogáz kihozatal (m ³ /kg száraz szervesa.)	Metántartalom (V/V %)
Szénhidrátok	0,79 – 0,83	50 – 55
Fehérjék	0,70 – 0,72	70 – 75
Zsírok	1,25 – 1,43	68 – 72

Forrás: Öllös et al. (2010)

A proteinek gyakorlatilag mindenfajta biológiai eredetű anyagban jelen vannak. Mivel a fehérjék bizonyos körülmények között kevésbé stabilak, így az

aminosavak közötti peptidkötések könnyen felszakadhatnak sejten kívüli, hidrolitikus enzimek hatására. A szubsztrátban így mindig előfordulhatnak szabad aminosavak és peptidek is.

A lipidek a legtöbb biológiai eredetű anyagban megtalálhatók és egyes esetekben a szervesanyag nagyobb részét is alkothatják. Hidrolízisük során zsírsavak és alkoholok képződnek. A lipidekben jelenlévő zsírsavak lehetnek nyílt láncúak vagy elágazók, telítettek vagy telítetlenek. A szénatomok száma általában 2 és 26 között változhat az adott lipid eredetétől függően. Szabad zsírsavak is előfordulhatnak a szennyvízben, mint a lejátszódó bakteriális anyagcsere végtermékei (Lackey és Hendrickson 1958).

Ha a könnyebben bomló fehérjék és szénhidrátok koncentrációja nagyobb, mint a nehezen bontható lipidek koncentrációja, akkor a biogáz termelés sebessége növekszik, míg abban az esetben, ha a lipidek koncentrációja a nagyobb, jelentősen lelassulhat a gáztermelés. A szerves vegyületek aránya sohasem állandó a szennyvízben, így a szennyvíziszapban sem, ez megnehezítheti a rothasztás folyamatainak kézbe tartását.

Természetesen az előbb bemutatott vegyületcsoportokon kívül eredetétől függően, változó mennyiségben számos más szerves vegyületcsoport is jelen lehet a szennyvíziszapokban, többek között antibiotikumok, növényi hormonok, peszticidek, detergensok, stb. Mindezek pozitívan vagy negatívan befolyásolhatják az anaerob rothasztási folyamatokat, még akkor is, ha rendszerint kis mennyiségben is vannak csak jelen.

Bizonyos szervesanyagok meghatározott koncentrációk között szükségesek a baktériumok metabolizmusa szempontjából, míg mások bizonyos koncentrációk felett toxikus hatást fejthetnek ki. Az elsődlegesen szükséges tápelemek a N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na, Cl, kisebb mennyiségben pedig a Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni, V, W is szükségesek.

2.3.4.4. Koszubsztrát hatás

Különböző szervesanyagok (pl.: mezőgazdasági, élelmiszeripari, vágóhídi, papíripari hulladékok) kommunális szennyvíziszappal történő együttes rothasztásával növelhető a biogáz mennyisége, javul a nehezen bontható szervesanyagok bonthatósága a könnyebben bontható szervesanyagok hatására, így jobban kihasználható a kevert szubsztrát rothasztással a rothasztó térfogata is.

A társított vagy koszubsztrát rothasztás kettő vagy annál több szubsztrátból készült homogén keverék közös fermentációját jelenti. Az alapszubsztráthoz (amely a rothasztó kialakításától függően nemcsak szennyvíziszap lehet, hanem mezőgazdasági biogáz telepek esetén növényi hulladék és/vagy állati trágya is) kiegészítő anyagokat (pl.: konyhai, vágóhídi vagy kerti hulladék) adagolnak és ezeket együtt fermentálják. Az alapszubsztrát biztosítja a fő tápelemeket (C:N:P legalább 100:5:1) és általában a mikroelemeket is. A jó makro- és mikrotápelem ellátás esetén a koszubsztrát rothasztás sokkal hatékonyabb, mint az egyféle tápanyagokat felhasználó mono-szubsztrát fermentáció (Öllös et al 2010.). A koszubsztrát rothasztás feltétele, hogy a keverék szubsztrátban az inhibíció okozó anyagok csak olyan koncentrációban legyenek jelen, hogy azok ne gátolják a lebontást. A koszubsztrát rothasztás egyre nagyobb szerephez fog jutni a modern hulladékgazdálkodás területén. Az Európai Unió elvárások és a hazai jogszabály (75/2002. FVM rendelet) nem teszik lehetővé a korábbi gyakorlatot, amely szerint az éttermi és egyéb konyhaipari hulladékot emberi fogyasztásra szánt háziállatok takarmányozására használják fel, így ezen szerves hulladékok kezelésére is megoldást jelenthet az anaerob fermentáció.

Ma leginkább a világon növényi hulladékokból állítanak elő biogázt, de nem mindegy, milyen növényi hulladékból. 1 kg száraz szervesanyagú repceből 0,9 m³ biogáz is előállítható, míg 1 kg száraz szervesanyagú fűből 0,5 m³ a megtermelhető biogáz (Barta 2002) (8. táblázat). Természetesen az alacsonyabb biogáz kihozattal nyújtó növények rothasztása is lehet gazdaságos, ha megfelelő mennyiségben állnak rendelkezésre vagy könnyen, gyorsan megtermelhetők. A tervek szerint hazánkban a megtermelt 8-9 millió tonna közötti kukoricából 2 millió tonnát energia előállításra is lehetne fordítani (Garai 2002, Palkó et al. 2005).

8. táblázat: A biogáz kihozatal különféle hulladékokból (irodalmi adatok)

Hulladékfajta	Biogáz kihozatal (m ³ /kg száraz szervesa.)	Metántartalom (V/V%)	Átlagosan képződött metán (m ³ /kg száraz szervesa.)
Zöldnövények (átlag)	0,50 – 0,60	55 – 60	0,36
Piaci hulladék	0,55 – 0,60	55 – 65	0,39
Zsírleválasztó hulladéka	0,60 – 1,00	70 – 75	0,75
Burgonyacefre	0,40 – 0,70	60 – 65	0,46
Repcezúzalék	0,40 – 0,90	65 – 70	0,63
Éttermi hulladék	0,80 – 1,00	60 – 65	0,65
Folyékony trágya	0,30 – 0,35	60 – 65	0,23
Szennyvíziszap	0,44 – 0,60	65 – 70	0,42
Fű	0,45 – 0,50	60 – 65	0,35

Forrás: Barta (2002), Garai (2002), Palkó et al. (2005)

2.3.4.5. Fajlagos szervesanyag terhelés

A stabil fermentáció biztosítása érdekében elsőrendű fontosságú, hogy milyen sebességgel adagoljuk a lebontandó szubsztrátot a rendszerbe. A terhelés elméletileg változtatható az átfolyási sebesség vagy a betáplált szubsztrát szervesanyag koncentrációjának a növelésével, illetve csökkentésével. Valójában a rothasztók terhelése ritkán változtatható a szerves szennyezők koncentrációjának módosításával, mivel ez a koncentráció az érkező szennyvízzal adott. A gyakorlatban így kézenfekvőnek tűnik az átfolyási sebesség megváltoztatása, amely természetesen magával hozza a fajlagos szervesanyag terhelés, illetve a tartózkodási idő megváltoztatását is. A rövid tartózkodási idő azt eredményezheti, hogy nagy mennyiségű lebontatlan anyag távozik a rothasztóból. A hosszú tartózkodási idő ugyan tökéletesebb lebontást biztosít, de ebben az esetben gazdaságossági kérdések merülnek fel. A gyakorlatban a középút kell választani a minél tökéletesebb lebontás és a gazdaságosan rövid tartózkodási idő között. A szervesanyag terhelést $\text{kg/m}^3 \cdot \text{d}$ mértékegységben szokás megadni. (Benedek és Oláh 1973)

2.3.4.6. Toxikus anyagok

Az anaerob lebontást részben vagy teljesen gátló anyagok a betáplált szubsztráttal kerülnek be a reaktorba vagy a lebontási folyamatok során keletkeznek. A gátló folyamatoknak az ismerete az üzemeltetés szempontjából óriási jelentőséggel bír. Számos anyag gátló hatása ismert, de ugyanakkor számos vegyület hatása mind a mai napig ismeretlen vagy éppen a vizsgálatok tárgyát képezi.

Sok fém jelenléte mikroelemként elengedhetetlen az anaerob lebontás megfelelő működéséhez. Felesleges mennyiségük azonban inhibitor vagy toxikus hatást fejt ki azáltal, hogy a fémionok kötéseket alakítanak ki az enzimekkel, a koenzimekkel így megváltoztatva szerkezetüket. A megváltozott szerkezetű enzim vagy koenzim már nem tudja ellátni feladatát. A nehézfémek az anaerob környezetben könnyen csapadékká alakulhatnak. Csapadékként jelentősek a szulfidok, karbonátok, hidroxidok. A fémek hajlamosak kelátkomplex képzésére is.

Tchobanoglous et al. (2003), valamint Öllös et al. (2010) munkájukban összefoglalták a gátló hatással bíró szerves és szervetlen alkotók toxikus koncentrációit, amelyeket a 9. táblázatban ismertetek.

9. táblázat: Az anaerob lebontás folyamatában mérgező hatású komponensek listája (szakirodalmi adatok)

Elemek és vegyületek neve	Toxikus koncentráció (mg/dm ³)
Nátrium	8000
Kálium	12000
Magnézium	3000
Kalcium	8000
Réz	300
Cink	250
Nikkel	500
Króm(VI)	200
Króm(III)	500
Vas(III)	500
Vas(II)	1000
Higany(II)	2,2
Cianid	5
Szulfid	50 – 200
Detergens	500
Fenol	150
Ammónium-N	3000
Ammónia-N	80
Illósav (ecetsavban kifejezve)	1500

Forrás: Tchobanoglous et al. (2003), Öllös et al. (2010) alapján

A nehézfémek toxicitása csak oldott formában jelentkezik, de oldott koncentrációjuk jelentősen lecsökkenhet kénhidrogénnel történő fém-szulfid formában történő kicsapódással. Abban az esetben, ha a reaktorban lévő szulfidion-koncentráció nem elegendő a toxikus nehézfémek kicsapódására, akkor vas(II)-szulfát adagolással biztosítható a szükséges szulfidion koncentráció.

A kénhidrogén gátolja a metántermelő, az ecetsav hasznosító és a savtermelő baktériumok életfolyamatait is. Semleges kémhatásnál már 200 mg/dm³ koncentrációjú kénhidrogén jelentősen gátolja a metántermelést. A disszociálatlan kénhidrogén (H₂S) könnyebben bejut a sejtmembránon, mint a disszociált forma (HS⁻), ezért a toxikus hatás a kisebb kémhatáson erőteljesebb. A kéntartalmú fehérjék bomlásával jelentős mennyiségű kénhidrogén keletkezhet, a szulfátredukáló baktériumok szulfid termelése a biogáz reaktorban kevésbé jelentős. Az oldott szulfidion koncentrációt egyértelműen meghatározza a kémhatás és a nehézfémek koncentrációja.

Az ammónia szintén a kémhatás függvényében, a kénhidrogénhez hasonlóan szabad ammóniaként (NH₃) könnyen bejut a sejtfalon és kifejti toxikus hatását. Az ammónia koncentrációja 80 mg/dm³ koncentrációt nem haladhatja meg, míg közel 3000 mg/dm³ ammóniumion koncentrációt is elviselnek a mikroorganizmusok.

A savtermelő fázisban keletkező illósav 1500 mg ecetsav/dm³ koncentráció felett gátolhatja a metántermelés folyamatát. Ebben az esetben is megállapítható, hogy a disszociálatlan forma okozza az inhibíciót.

2.3.4.7. Az előkezelés hatása az anaerob lebontásra

Az eleveniszapban lévő baktériumok egymáshoz kapcsolódva pelyheket hoznak létre, ebben a pehelyszerkezetben jelentős szervesanyag, iszapvíz és egyéb, inert vegyület megtalálható. Az előkezelési eljárások során az iszap pelyhek szerkezetét, majd az azt alkotó sejteket roncsolják, illetve bizonyos eljárásokkal az iszap biológiai lebonthatóságának javítását érik el (Nies et al. 2000). Az iszaprothasztás során a leggyakrabban alkalmazott eljárások a mechanikai roncsolás és őrlés, az ultrahangos roncsolás, a szerves vegyületek kémiai roncsolása erős savakkal vagy lúgokkal, a termikus eljárások, az enzimes és/vagy mikrobiológiai előkezelési eljárások (Delgenès et al. 2003). A mechanikai roncsolás alapvetően nem a sejteket, hanem az iszap pelyhek szerkezetét módosítja. A pelyhek aprításának eredményeképpen a fajlagos felület növekszik, így a baktériumok jobban hozzáférnek a lebontandó anyaghoz, ezért a lebontás hatékonysága növelhető (Delgenès et al. 2003). A kémiai roncsolással a hidrolízis folyamatait, elsősorban a fehérjék hidrolízisét gyorsíthatjuk fel (Henze és Mladenovski 1991). A termikus eljárások hatására a sejtfal felbomlik, a sejt plazma oldatba megy és a sejt plazmában lévő polimerek szintén hidrolízist szenvednek, amelyekhez a baktériumok szintén könnyebben hozzáférnek (Li és Noike 1992, Sawayama et al. 1995, Baier és Schmidheiny 1997 Schieder et al. 2000, Müller 2001). A biokémiai eljárások csoportjába tartozó enzimes előkezelések során különböző enzim készítményeket adagolnak az iszaphoz. Az enzimes előkezelési eljárásokat cellulóz-, lignintartalmú hulladékok együttrothasztása előtt szokták alkalmazni (Delgenès et al. 2003, Kim et al. 2005, www.cowatec.com)

A 10. táblázatban a különböző roncsolási, illetve feltárási típusokat és a leggyakrabban alkalmazott eljárásokat, berendezéseket ismertetem Li és Noike (1992), Sawayama et al. (1995), Baier és Schmidheiny (1997) Kunz és Wagner (1996), Schieder et al. (2000), Nickel és Neis (2004) nyomán. A felsorolt eljárások alkalmasak a pehelyszerkezet mechanikai roncsolására és ezzel együtt a sejtek feltáráására is. A kémiai és biokémiai feltárási, valamint a hőkezelés során a sejt fal roncsolása, ezáltal a sejt feltárási meghatározó jelentőségű. A felsorolt eljárások sok esetben kombinálhatók (kombinált eljárások), ezáltal a kezelés hatékonysága növelhető.

10. táblázat: Előkezelési eljárások csoportosítása

Az eljárás típusa		Az alkalmazott eljárás vagy berendezés
Fizikai eljárások	Mechanikai aprítás és őrlés	golyós malom nagynyomású homogenizálás centrifugával roncsolás ultrahangos roncsolás elektromos erővel történő roncsolás
	Elektromágneses sugárzások alkalmazása	mikrohullám alkalmazása γ -sugárzás alkalmazása
Kémiai eljárások		erős savval vagy lúggal történő kezelés oxidálószer alkalmazása
Termikus eljárások		az iszap felfűtése (optimális hőmérséklet: 175 °C)
Biokémiai eljárások		különböző enzimek adagolása mikrobiológiai előkezelés

Forrás: Li és Noike (1992), Sawayama et al. (1995), Baier és Schmidheiny (1997) Kunz és Wagner (1996), Schieder et al. (2000), Nickel és Neis (2004) alapján saját szerkesztés

A következő alfejezetekben az enzimes és az ultrahangos előkezelésre részletesen kitérek, mert a laboratóriumi kísérletsorozatban enzimmészítmény (MethaPlus®), valamint félüzemi körülmények között ultrahangos előkezelés hatásának vizsgálatát is célul tűztem ki.

2.3.4.7.1. Enzimes előkezelés

A szakirodalmak (Scheidat et al. 1999, Kim et al. 2005, www.cowatec.com) nyomán megállapítható, hogy jelentős eredményeket ért el növényi hulladékok (elsősorban cellulóz és a hemicellulóz) bontásában a szennyvíziszaphoz adagolt különböző enzimmészítmények (például: MethaPlus® enzimmészítmény) segítségével. A MethaPlus® enzimmészítmény celluláz, xilanáz, β -glukanáz enzimmixonatot tartalmaz. Az enzimmészítmény az anaerob lebontás első, hidrolitikus folyamataiba kapcsolódik be. Az anaerob fermentáció sebesség-meghatározó lépése éppen ez, a szerves makromolekulák hidrolízise. Kereskedelmi forgalomba folyadék és szilárd halmazállapotban kerül. Az enzimmixonatot 7,5 – 8,0 pH intervallumban alkalmazható. A kísérleti adatok alapján a gázkihozatal 12-30%-kal (www.cowatec.com), illetve 3-35%-kal (www.biopract.de) növekedett. Átlagosan 18% gázhozam növekedést tapasztaltak és a gázösszetételen belül javult a metán aránya is. A MethaPlus® enzimmészítmény 2005-ben került bevezetésre Nyugat-Európában (elsősorban Németországban) a mezőgazdasági biogáz telepek gázkihozatalának optimalizálása érdekében.

A 11. táblázat tartalmazza szakirodalmi adatok alapján az enzimmészítmény fizikai tulajdonságait.

11. táblázat: A MethaPlus® enzimmészítmény fizikai tulajdonságai

	szilárd MethaPlus®	folyadék MethaPlus®
Konzisztencia	világos barna por	kissé viszkózus, vöröses-barna folyadék
Szag	fehérjére emlékeztető	élesztőre emlékeztető
Fehérjetartalom	200-250 mg/g	150-200 mg/g
Tartósítószer	-	3 mg/g Na-benzoát
pH	-	4,0 – 5,0
Az alkalmazott enzimek neve	xilanáz, β -glükánáz, celluláz	

Forrás: www.cowatec.com

Az enzimmészítményt 30 mezőgazdasági biogáztelepen, mezofil hőmérsékletű anaerob fermentorokban próbálták ki az alábbi átlagos paraméterek mellett (www.cowatec.com):

- átlagos fermentor méret: 690 m³
- szubsztrát bevitel: 3,0 szárazanyag t / d
- átlagos hőmérséklet: 41,6 °C (mezofil hőmérséklet)
- átlagos szervesanyag terhelés: 5 kg száraz szervesa./m³ * d (min: 1 kg száraz szervesa./m³ * d és max: 15 kg száraz szervesa./m³ * d)
- tartózkodási idő: 42 nap (min: 11 nap, max: 99 nap)

Az irodalmi adatok alapján a készítményt termofil körülmények között nem próbálták ki.

2.3.4.7.2. Ultrahangos előkezelés

Az iszap előkezelési eljárások között egyre nagyobb szerepet kap az ultrahangos előkezelési eljárás (kavitronozás). Ez az eljárás 2-8% szárazanyag-tartalmú iszap kezelésére alkalmas, amely során az iszapot kb. 21 kHz frekvenciájú ultrahang behatás éri. Az ultrahang hatására kialakuló nyomásváltozás az iszapban lévő sejtek roncsolását okozza (Thiem et al. 1997, Chu et al. 2011). Harminc perces kezelés hatására az iszapsejtek szerkezet roncsolódik (Németh 2004, Öllös et al. 2010). Az ultrahangos kezeléssel az oldhatatlan lebegő anyagok egy része is oldatba vihető (Chu et al. 2011), így a rothasztás feltételei kedvezőbbé válnak. Thiem et al. (1997) munkájában az ultrahanggal kezelt iszapot 31 kHz frekvenciával kezelve, majd a rothasztóban 22 napos tartózkodási idő mellett a kezeletlen iszapnál 45,8%, míg a kezelt iszap esetén 50,3%

lebontási hatásfokot ismertet. Az ultrahangos roncsolást a primer és a fölös iszap keverék esetében célszerű alkalmazni, tisztán primer iszap esetén elsősorban a sejtek aprítása történik. A részecskék mérete 5 perces kezelés hatására 50-100 μm -ról 8-10 μm -re csökkenthető, amely mindenképpen jelzi az izsappelyhek roncsolódását (Öllös et al. 2010).

Az ultrahangos kezelés a hidrolízis meggyorsítását, illetve elősegítését célozza, és összehasonlítva a termikus kezeléssel alkalmazása tízszeres energia megtakarítást eredményez. A hidrolízis meggyorsításával a hidraulikus tartózkodási idő lerövidíthető, így azonos tartózkodási idővel számolva a biogáz mennyisége növelhető. Ezen módszer alkalmazásával a már üzemben lévő rothasztók terhelése optimálható, kapacitása növelhető, illetve az újonnan építendő fermentorok esetén pedig a költséghatékonyság javítható (Öllös et al. 2010).

2.4. Az anaerob lebontás folyamatát nyomon követő klasszikus üzemellenőrzési paraméterek

A szennyvíztisztító telepeken működő iszaprothasztókban lejátszódó folyamatok ellenőrzésére több paraméter áll rendelkezésre. A mindennapi gyakorlatban használt paraméterek között csak kémiai paramétereket találunk, biokémiai paramétereket csak elvétve alkalmaznak a fermentorok jellemzésére.

A leggyakrabban alkalmazott üzemellenőrzési paraméterek a kémhatás, a szárazanyag-, a szervesanyag-tartalom, a kémhatás, az illósav, a lúgosság, az illósav/lúgosság aránya, a gázmennyiség és gázösszetétel. A felsorolt paraméterek körét bizonyos esetekben kiegészítik a redoxipotenciál mérésével. Az illósav/lúgosság aránya, mint ellenőrző paraméter a fermentáció állapotát jellemzi, amely a két mért paraméterből számolható. Az illósav/lúgosság arálynak általában 0,02 alatt kell lenni.

Igen fontos az anaerob rothasztó hatásfokának a meghatározása is, mivel ez közvetlenül kihat a végső elfolyó anyag minőségére, valamint a folyamat gazdaságosságára. A hatásfok csökkenése a folyamat meghibásodására utal, éppen ezért a hatásfok ellenőrző paraméternek is tekinthető. Az anaerob rothasztó hatásfoka mérhető a reaktorba betáplált, illetve az onnan távozó anyagok kémiai oxigénigényében (KOI), szervesanyag- vagy széntartalmában is. Egy másik paraméter pedig megmondja, hogy a fermentorba táplált, kémiai oxigénigényben megadott szervesanyag hány százaléka alakult át biogázzá. Az ezen adatokból számított hatásfok a szóban forgó szubsztrátra jellemző, az ettől való eltérések a folyamat egyensúlyviszonyainak a

felborulására utalnak. Gyakorlatban a szennyvíziszap anaerob rothasztásánál a hatásvokot a szervesanyag lebontására vonatkoztatják (Öllös et al. 2010).

A Magyar Szabványügyi Testület hivatalos honlapján (www.mszt.hu) szennyvíziszap vizsgálatokra összesen 25 szabványt találunk, amelyek közül már 4 visszavont. Az érvényben lévő 21 szabvány közül 13 szabvány valamilyen elemtartalom meghatározását tárgyalja, a fennmaradó szabványok között találjuk a leggyakrabban alkalmazott üzemellenőrzési paraméterek meghatározásait tartalmazó szabványokat. A szabványok közül csak egy foglalkozik bakteriológiai vizsgálatok leírásával, enzimaktivitás vizsgálatokat egyáltalán nem találunk a szabványok között.

2.5. Az anerob lebontás nyomon követését segítő enzimaktivitás vizsgálatok

Mint a 2.3.2.1. fejezetben ismertetésre került, az anaerob fermentáció első folyamata a hidrolízis, amely a lebontási sebesség meghatározó lépése. A lebontási folyamatok nyomon követésére enzimaktivitás mérések alkalmazhatók, így pl. a sejtek összes aktivitását jellemző dehidrogenáz és a szubsztrát specifikus proteáz, lipáz és celluláz enzimaktivitások. Használatuk az üzemellenőrzés folyamatában hasznos, mert enzimaktivitás vizsgálatokkal további információkhoz juthatunk a fermentáció körülményeiről.

2.5.1. Dehidrogenáz enzimaktivitás

2.5.1.1. A meghatározás elméleti alapja

A meghatározás elméleti alapját a szénhidrátok lebontásakor lejátszódó folyamat utolsó lépése adja, azaz a citrátkörben keletkező redukált koenzimek az elektrontranszportláncon keresztül oxidálódnak. Ezeket a koenzimeket nevezi a szakirodalom dehidrogenázoknak is, hiszen amikor redukálódnak, akkor reakciópartnerüktől „elveszik” a hidrogént, azaz dehidrogénezik azt. Az elektrontranszport a lebontó folyamat utolsó lépése, amelynek intenzitása jól jellemzi a sejtek aktivitását (Fahmy és Walsh 1952, Szabó 1989).

Az elektrontranszport-láncban aerob körülmények között az utolsó elektronakceptor (elektronfelvő) az oxigénmolekula. Terminális elektronakceptor lehet bármilyen megfelelő redoxipotenciállal rendelkező vegyület, amely képes átvenni a molekuláris oxigén szerepét és mérhető változás játszódik le redukciója következtében, ezt a szerepet például a 2,3,5-trifenil-tetrazólium-klorid is betöltheti (Fairbridge et al. 1951). Több szerző (Griebe et al. 1997, Goel et al. 1998) és egy hazai

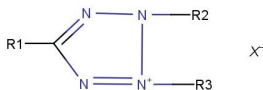
szabvány szerint (MSz-08-1721/3-86) összefoglalásképpen megállapítható, hogy az alkalmazott módszer alapja, hogy a 2,3,5-trifenil-tetrazólium-klorid a sejtben átvieszi a terminális elektronakceptor szerepét, ezáltal redukálódik trifenil-formazánná (TF), amelynek mennyisége előzetesen felvett kalibrációs görbe alapján 485 nm-en spektrofotometriásan meghatározható.

2.5.1.2. A trifenil-tetrazólium-klorid (TTC)

A 2,3,5-trifenil-tetrazólium-kloridot (továbbiakban TTC) először 1894-ben Pechmann és Runge állított elő (Tengerdy et al. 1967). Leírták a vegyület szerkezetét és tulajdonságait, ezután a továbbiakban kizárólag csak a szerves kémia szempontjából vizsgálták, redoxi tulajdonságaiban rejlő gyakorlati felhasználásával nem foglalkoztak.

Az általánosan használt redoxiindikátorok (pl.: metilénkék) oxidált formája színes és a redukált állapotú alakja színtelen. A TTC oxidált formája viszont gyakorlatilag színtelen, illetve tömény oldata enyhén világossárga színű, míg redukált állapotban (2,3,5-trifenil-formazán, továbbiakban: TF) jellegzetes vörös. A biológiai minták redukálóképességének mérésekor jobban követhető a redoxiindikátor változása, illetve a kiértékelést elősegíti, hogyha a reakció során egy színtelen vegyületből színes vegyület képződik (Tengerdy et al. 1967).

A tetrazólium sók általános szerkezeti képletét a 7. ábra szemlélteti, amelyen jól látszik, hogy a központi tetrazólium gyűrű négy nitrogénatomja közül az egyik kvaterner, így pozitív töltésű. Ennek következménye, hogy a tetrazólium vegyületek sóként viselkedhetnek, legtöbbször halogenidekkel (elsősorban klorid-, jodidionokkal) alkotnak vegyületet (Neumüller 1981).



7. ábra: A tetrazólium sók általános szerkezeti képlete (saját szerkesztés)

Megjegyezendő, hogy a tetrazólium vegyületek könnyen redukálhatók, de csak erőlyes oxidálószer képesek oxidálni őket. A tetrazólium vegyületek további előnye más redoxiindikátorokkal szemben, hogy kevésbé toxikusak (LD_{50} (egér) = 5600 µg/kg).

2.5.1.3. A dehidrogenáz enzimaktivitás meghatározása

Aerob tulajdonságú szennyvíziszapok (primer iszap és/vagy fölösiszap, kevert iszap minták) aktivitásának meghatározására többször alkalmaztak dehidrogenáz enzimaktivitás vizsgálatot (Miksch 1983, 1985, 1988, Lopez et al. 1986). Skujins (1976), valamint García et al. (1998) anaerob talajminták dehidrogenáz aktivitását ismertetik. Dehidrogenáz aktivitás mérésére elérhető nemzetközi [talajminták esetén a BS EN ISO 23753-1:2011 (angol), az ISO 23753-1:2005 (osztrák), az NF EN ISO 23753-1 (francia)] és hazai (MSZ-08-1721/3-86) szabványok. Szennyvizekre vonatkozóan pedig a DS 296:1984 (dán), míg a hazai MSZ 260/46-81 szabvány tisztított szennyvíz esetében ismertet dehidrogenáz aktivitás vizsgálatot, de anaerob módon fermentált szennyvíziszap minták dehidrogenáz vizsgálatára nem található szabvány. A szakirodalom áttanulmányozása után megállapítható, hogy a dehidrogenáz mérését az oldott oxigén koncentráció, a TTC koncentrációja, valamint az inkubációs idő jelentősen meghatározza, ezért a következőkben ezeket a legfontosabb paramétereket és hatásaikat foglalom össze.

2.5.1.4. Az oxigén koncentráció szerepe

A dehidrogenáz enzimaktivitás vizsgálatakor célunk, hogy lehetőség szerint a legpontosabban határozzuk meg az iszap sejtek aktivitását. Ehhez arra van szükség, hogy a sejtek számára optimális körülményeket biztosítsunk, hogy aktivitásukat ne korlátozzák környezeti tényezők. A pontos mérés érdekében fontos, hogy a végső elektronakceptor minden esetben a TTC legyen. A mintákban esetlegesen jelenlévő oxigén, annak ellenére, hogy a redoxipotenciálja kedvezőtlenebb, mint a TTC redoxipotenciálja, szintén képes a terminális elektrontranszportlánc végén elektron felvételére. Ha az elektronakceptor az oxigén, akkor víz keletkezik a trifenil-formazán helyett, így a valószínűleg kisebb enzimaktivitás mérhető. A TTC redukciója és a víz keletkezése párhuzamosan futó reakciók.

A dehidrogenáz aktivitás vizsgálata is több mint 60 éves múltra tekint vissza. 1949-ben Kun és Abood (1949) patkányok májának homogenizátumában vizsgálta a dehidrogenáz aktivitást. Megállapították, hogy kevesebb trifenil-formazán keletkezik aerob körülmények között, mint anaerob körülmények között. Klapwijk et al. (1974) kísérleti munkájuk során megállapították, hogy anaerob körülmények közötti inkubálást követően az aerob inkubációhoz viszonyítva 356% abszorbancia növekedést tapasztalható (az abszorbancia 0,278-ról 1,27-re nőtt).

Sokáig nem végeztek kísérleteket arra vonatkozóan, hogy az oldott oxigén szerepét tisztázzák. Miksch (1983) laboratóriumi vizsgálatai során arra kereste a választ, hogy található-e mennyiségi összefüggés az oldott oxigén koncentrációja és a dehidrogenáz aktivitás aerob körülmények között mért csökkenése között. Munkája során hat különböző aktivitású eleveniszap mintával dolgozott. Az aerob baktériumokat tartalmazó mintákhoz (az aktivitásukkal arányos mennyiségű) TTC-oldatot mért be. Ezután a különböző aktivitású minták mindegyikéből készített öt olyan párhuzamos mintát, amely nem tartalmazott légköri oxigént (amit Na_2SO_3 -oldattal biztosított) és öt olyan párhuzamos mintát, amely tartalmazott oxigént. Az így elkészített mintákat 1 órán át sötét helyen inkubálta. Az inkubációt követően a mintákat leszűrte. A szűrés után a keletkezett trifenil-formazánt metanollal rázta ki a vizes fázis teljes elszíntelenedéséig. Az így nyert extraktumoknak 485 nm hullámhosszon meghatározta az abszorbanciáját. Minden minta esetében nőtt az abszorbancia, ha a reakcióelegy tartalmazott Na_2SO_3 -oldatot. A növekedés mértékében azonban jelentős eltérések voltak. A minták egy részénél a növekedés 100% feletti volt (103%, 128%, 213%). A legnagyobb aktivitású mintáknál ennél sokkal kisebb növekedést tapasztalt (2%, illetve 17%). Ez azzal magyarázható, hogy a nagy aktivitású mintákban a mikroorganizmusok gyorsan felhasználják az oldott oxigént és kialakul az oxigént nem tartalmazó mintákhoz hasonló állapot. Az oxigén zavaró hatásának kiküszöbölésére, kísérleti tapasztalatai alapján Miksch (1983) a nátrium-szulfit (Na_2SO_3) adagolását javasolta.

Összefoglalásképpen megállapítható, hogy a TTC-vel végzett dehidrogenáz enzimaktivitás meghatározások során a légköri oxigén hatását érdemes kiküszöbölni. Az oxigén eltávolítása nátrium-szulfit adagolásával ugyanis egyszerűen megoldható és több szempontból is előnyös. Kis szórással jellemezhető, a valósághoz közelálló eredményt kapunk, ha nincs oxigén a reakcióelegyben.

2.5.1.5. A TTC koncentráció szerepe

A dehidrogenáz enzimaktivitás TTC-vel történő meghatározásokor nyilvánvaló, hogy a TTC mennyiségének a mintában legalább olyan koncentrációban kell lennie, amennyit a jelen lévő mikroorganizmusok át tudnak alakítani. A TTC koncentrációja semmi esetre sem lehet korlátozó tényező, ezért az tűnik előnyösnek, ha a TTC-t feleslegben adjuk a mintához. Ugyanakkor megjegyezendő, hogy a TTC különböző mértékben ugyan, de minden mikroorganizmusra, valamint a magasabb rendű

szervezetekre is toxikus. Ha túl nagy koncentrációban adjuk a TTC-t a mintához, akkor a sejtek pusztulása miatt a valóságos aktivitáshoz képest kisebb értékeket kapunk.

Jerchel és Fischer magasabb rendű élőlények (egerek és halak) TTC toleranciáját vizsgálták (Miksch (1988)). Eredményeik alapján megállapították, hogy a tetrazólium vegyületek toxicitása az aromás szubsztituensek számának növekedésével emelkedik.

Miksch (1988) szerint a dehidrogenáz aktivitás mérése akkor végezhető el megbízhatóan, ha a TTC koncentráció már megfelelő, de még nem toxikus, illetve az alkalmazható (optimális) koncentráció tartomány széles intervallummal jellemezhető. Ebben az esetben a mért enzimaktivitás jól megközelíti a mikroorganizmusok maximális aktivitását. Miksch (1988) javaslata szerint a kísérletek megkezdése előtt az alkalmazott mikroorganizmusoknak megfelelő TTC koncentráció intervallumot meg kell határozni.

2.5.1.6. Az inkubációs idő szerepe

A szakirodalmi források szerint (Miksch 1985, 1988) az inkubációs idő megválasztásának nincsen túl nagy jelentősége. Általában feltételezik, hogy az inkubációs idő növekedésével a trifenil-formazán képződése is arányosan nő, ezért szokás az inkubációs időt rövidebbre (pl.: felére, negyedére) választani, mint amennyi idő kellene, hogy a mikroorganizmusok kifejtthessék teljes aktivitásukat. Vannak azonban olyan szakirodalmi források is (Wellens és Zahn 1971), amelyek szerint a trifenil-formazán képződése időben nem fokozatosan történik. Javaslataink szerint a dehidrogenáz enzimaktivitás meghatározását mindig anaerob körülmények között kellene végezni, így a TF képződése jobban megközelíti az időbeli lineáris változást. Miksch (1988) kísérleti munkája során azt tapasztalta, hogy az inkubációs idő első szakaszában képződő TF mennyisége nagyobb az arányosan vártnál.

2.5.1.7. A vizsgálati módszerek értékelése

A szakirodalmi áttekintésből is kiderül, hogy a dehidrogenáz aktivitás mérése aerob környezetből származó minták esetén megfelelő szakirodalommal rendelkezik, mérése megoldottnak tekinthető. Az anaerob környezetből származó minták vizsgálata nem gyakori, szakirodalma szegényes, a legtöbbször csak talajminták aktuális dehidrogenáz aktivitására szorítkozik. Az állatok vizsgálni kívánt anaerob szennyvíziszap minták dehidrogenáz aktivitásának meghatározáshoz a talaj aktuális dehidrogenáz aktivitásának mérését ismertető hazai MSZ-08-1721/3-86 számú

szabvány, valamint aerob eleveniszap minták dehidrogenáz enzimaktivitásának mérésével foglalkozó Griebel et al. (1997), Goel et al. (1998) cikkei szolgáltattak alapot.

2.5.2. Proteáz enzimaktivitás

A fehérjék aminosavakból állnak, melyek peptidkötésekkel kapcsolódnak egymáshoz. A peptidkötés két aminosav között úgy jön létre, hogy az egyik aminosav karboxilcsoportja egy másik aminosav aminocsoportjával kondenzációs reakcióba lép, vagyis vízkilépés közben reagál. Ennek megfelelően a peptidkötés felbontása víz segítségével, hidrolízissel megy végbe.

A fehérjék lebontásának kezdeti szakasza a polipeptidlánc kisebb peptidekké, majd aminosavakká való bontása. Ez a peptidkötések hasításával valósul meg, amelyet proteáz enzimek végeznek. A fehérjebontó proteáz enzimek minden élő sejt számára nélkülözhetetlenek, növényi és állati szervezetekben egyaránt megtalálhatóak.

Az egyes proteázok jól definiált aminosav kapcsolódási helyeket felismerve hasítanak. Az élő szervezetekben a különböző enzimek működése jól kiegészíti egymást. A termelő szervezetek szerint megkülönböztetünk bakteriális és gomba eredetű, valamint savas, semleges, illetve lúgos környezetben aktív proteázokat.

Bizonyos proteázok a polipeptidlánc belső részénél kezdik bontani a peptidkötéseket, ezeket az enzimeket endopeptidázoknak nevezzük. Más enzimek a fehérjelánc valamelyik végén kezdik a kötések hasítását, ezek az exopeptidázok. A karboxipeptidázok a fehérjelánc szélén elhelyezkedő, szabad karboxilcsoporttal rendelkező aminosavnál, az aminopeptidázok a fehérjelánc szélső, szabad aminocsoporttal rendelkező aminosavjánál kezdik a fehérjelánc lebontását.

A proteáz enzimek nagy része semleges kémhatású környezetben és fiziológias hőmérsékleten fejt ki leginkább hatását (Szabó 1989).

Anaerob körülmények közti energianyerésre aminosavak is felhasználhatóak. A fermentáció úgy zajlik, hogy egy aminosavpár egyik tagja oxidálódik, míg a másik hidrogén-akceptorként viselkedik, miközben nagy energiájú foszfátkötések szintetizálódnak (Stickland-reakció). Alifás aminosavak (alanin, leucin, izoleucin, norvalin, valin) oxidálhatóak így, a redukálódó aminosavak glicin és prolin lehetnek. Termékként ammónia és ketosavak (pl. piroszólósav) keletkeznek. A ketosav széndioxidot veszít. A folyamat végeredményeként ecetsav, ammónia és széndioxid keletkezik.

Létezik olyan lebontás is, amelynek csak alanin a kiindulási anyaga. Ekkor propionsav, ecetsav, szén-dioxid és ammónia keletkeznek (Szabó 1989).

Szennyvíziszapok proteáz aktivitásának mérését először Thiel és Hattingh (1967) írta le. Munkájukban anaerob szennyvíziszap minták proteáz enzimaktivitásának mérését ismertetik, ez a mérési leírás adta az általam alkalmazott proteáz enzimaktivitás mérési módszer alapját. Eleveniszap minták aerob és anaerob körülmények között végzett proteáz enzimaktivitásának mérési eredményeit Goel és munkatársai (1998) ismertetik. Rejsek et al. (2008) talajminták proteáz enzimaktivitásának mérését írják le.

2.5.3. Lipáz enzimaktivitás

A lipázok a növényi és az állati eredetű olajok, illetve zsírok (trigliceridek) észterkötéseit hidrolizálják, s így glicerin és szabad zsírsavak keletkeznek.

A lipázok előállítására elsősorban penészgombák (pl.: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* törzsek) fermentációjával lehetséges, de ha a táptalajt olajokkal vagy zsírokkal egészítjük ki, élesztőgombák (pl.: *Candida*) vagy baktériumok (pl.: *Lactobacillus*) is kiválasztják.

A lipáz enzimaktivitás méréshez Vorderwülbecke et al. (1992), valamint Li és Chróst (2006) munkáit használtam fel. Mindkét szakirodalomban anaerob iszapminták lipáz enzimaktivitásának mérését ismertetik, ezek a módszerek képezték az általam kifejlesztett lipáz mérési módszer alapját.

2.5.4. Celluláz enzimaktivitás

A növényi rostokban igen nagy mennyiségben előforduló cellulóz, lignocellulóz, hemicellulóz, lignin az anaerob fermentáció során nehezen bomlik. Így a reaktorba bevezetett szervesanyag egy része lebomlatlanul hagyja el a reaktort.

A celluláz enzimes bontását három különböző enzimaktivitással írhatjuk le, amelyek között megkülönböztethetünk endoglukanázokat, cellobiohidrolázokat, valamint cellobiázokat. A cellobiáz vagy más néven β -glükozidáz katalizálja a cellobiáz b-glükozid vagy karboximetil-cellulóz (CMC) kötéseinek hasítását. A cellobiáz aktivitás a CMC és a rothasztóban a cellulóz származékok lebontása során keletkező glükóz képződési sebességgel arányos, amely fotometriásan meghatározható. (Dienes 2006)

Gerardi (2003) kutatása alapján a celluláz enzim (*Cellulomonas* baktérium exoenzimje) megbontja a cellulóz polimer molekulában a glükóz molekulák közötti b-

glükózid kötéseket. Ezt követően az oldatba jutott glükóz molekulák a sejtekbe kerülnek és ekkor már az endoenzimek segítségével történik meg a további lebontás.

A celluláz enzimaktivitás mérésének kidolgozásakor a papírgyári iszap celluláz aktivitásának jellemzésére vonatkozó Lee et al. (2002) és az anaerob módon fermentált szilárd kommunális hulladék aktivitásának nyomon követésére alkalmazott Rivard et al. (1994) cikkek szolgáltak kiindulásként. Talajminták aktuális celluláz enzimaktivitásának mérése mára már kidolgozott, ezt ismertetik Deng és Tabatabai (1994) munkájukban.

3. Anyag és módszer

3.1. Kísérleti munka során alkalmazott berendezések

3.1.1. A vizsgálatok színhelyének bemutatása

Kísérleti munkámat a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen (Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.) lévő üzemi rothasztókból, illetve a telepen lévő féliüzemi fermentorokból származó iszappal végeztem. Laboratóriumi méréseimet mind a telepi, mind pedig az egyetemi laboratóriumban (Eötvös Loránd Tudományegyetem, Környezettudományi Kooperációs Kutató Központ vízlaboratóriumában) folytattam.

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep jelenlegi névleges kapacitása $80000 \text{ m}^3/\text{d}$ (évi 22 millió m^3). A telep jelenleg négy dél-pesti kerület (XVIII., XIX., XX., XXIII. kerület) kommunális szennyvizét tisztítja. Az ipari szennyvízbevezetés aránya a teljes kísérleti munka időtartama alatt nem érte el a 20%-ot. A szennyvíztisztító telep háromfokozatú eleveniszapos technológiát alkalmaz. A harmadik fokozatban a tápelemek eltávolítása is megtörténik. A keletkezett víztelenített iszap mennyisége $49,3 \text{ m}^3/\text{d}$ ($18000 \text{ m}^3/\text{év}$). A telepen $9500 \text{ m}^3/\text{d}$ biogáz képződik (évi $4,3$ millió m^3) (Fővárosi Csatornázási Művek Zrt, 2008).

Az iszapkezelési technológia részletes bemutatására a 3.1.1.2. fejezetben kerül sor.

3.1.1.1. A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep és iszapkezelésének története

Kezdetben a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep Pesterzsébet, Kispest és Pestszentlőrinc szennyvizének tisztítására épült. A tervezett telep helyét 1952. december 23-án az Országos Tervhivatal jelölte ki, mert az egyesített rendszerű főgyűjtő a Torontál utcánál végződött, ahonnan nyílt árkon (Népjóléti-árok) folyt a szennyvíz a Ráckevei-Soroksári Duna-ágba. Ez a Duna-ág a kis vízfolyásának köszönhetően gyakorlatilag állóvíznek tekinthető, így a telep megépítése az élővilág további károsodásának elkerülése érdekében indokolt volt.

Az építkezés 1955-ben indult meg (a munka 1956 végétől 1958 nyaráig szünetelt), a részleges üzembe helyezés 1962-ben, míg a teljes üzembe helyezés 1966 őszén zajlott (1966. szeptember 16-tól működik üzemszerűen). A telep akkor $30000 \text{ m}^3/\text{d}$ névleges kapacitással, mechanikai és eleveniszapos biológiai fokozattal rendelkezett. Az első biológiai tisztítóegység egy két ágból, egyenként nyolc, párhuzamosan kapcsolt, levegőztetett medencéből álló, nagyterhelésű eleveniszapos

rendszer volt. Az előülepítőben és az utóülepítőben keletkezett iszapot az iszapsűrítőbe, onnan pedig iszapszivattyú segítségével a rothasztó tornyokba táplálták. Az iszap kezelése 1967-től négy darab, egyenként 2600 m^3 -es térfogatú, mezofil hőmérsékletű rothasztóban történik. A négy rothasztó közül egy utórothasztóként jelenleg is működik. Az iszap keverésére elsősorban a keletkezett biogáz diffúziója szolgált, de szükség szerint a megfelelő keverés az iszapszivattyúkkal biztosítható volt. Az iszap átlagos tartózkodási ideje a rothasztókban 30 nap volt. A kirothasztott iszapot nyomócsövön keresztül szárítóágyakra jutatták. Az iszap szikkasztására 25 darab, összesen 7500 m^2 felületű szárítóágy szolgált. Az iszap egy részét a telep mellett akkor működő komposztüzembe szállították további felhasználás céljából. A komposztáló üzem azóta megszűnt. Az iszapkezelés mai technológiai lehetőségeit ismerve és az iszap további (pl.: mezőgazdasági) felhasználását tekintve a komposztáló üzem megszüntetése sajnálatos lépésnek tűnik (Garami et al. 1972, Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. 2007).

A telep vízvonalai és iszapvonalai technológiája folyamatosan fejlődött. Az 1980-as években jelentős bővítésekre került sor. 1983-ban megépült két párhuzamos biológiai tisztítótor, 1985-ben megkezdődött a mezofil rothasztókban kezelt iszap gépi víztelenítése is. 1986-tól a biológiai medencéket mélylégbefúvós technológiával üzemeltetik. 1989-től megkezdődött a megtermelt biogáz gázmotorban történő hasznosítása. 1992-ben tovább bővült a hidraulikus kapacitás, amikor a szennyvíz zsírs- és homoktartalmának eltávolítására új előmechanikai egység épült. A telep fejlődésének kiemelt állomása az 1999-es év, az ekkor végrehajtott vízvonalai bővítésekkel és korszerűsítésekkel a telep alkalmassá vált a $80000 \text{ m}^3/\text{d}$ szennyvíz teljes biológiai tisztítására, beleértve a kétlépcsős nitrogén- és foszforeltávolítást is (Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. 1999).

Az iszapkezelés szempontjából meghatározó jelentőségű a 2001-ben megújult és kibővült iszapkezelési folyamat: egy új, fedett, szagtalanító berendezéssel ellátott gravitációs sűrítő épült, üzembe álltak az iszap gépi sűrítésére és víztelenítésére szolgáló centrifugák, üzembe állítottak a képződő biogázból villamos energiát előállító nagy teljesítményű gázmotort, illetve egy szilárd töltetű biogáz kéntelenítőt is.

A nagy szervesanyag-tartalmú hulladékok fogadására fogadó- és feldolgozó-állomás épült (2005), valamint 2005 óta üzemszerűen működik hazánk egyik legnagyobb kapacitású (2000 m^3) termofil iszaprothasztója is. Attól az évtől kezdve egy új, nagyobb gázmotor (2 db 2 MW teljesítményű) segítségével hasznosítják a megtermelt biogázt is (Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. 2007).

3.1.1.2. Az iszapvonali technológia bemutatása

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep iszapvonali technológiáját a telepen végzett munkám során 2005-2009 között részletesen megismerhettem. A technológiai egységek ismertetésekor a személyes tapasztalataim mellett a Fővárosi Csatornázási Művek belső felhasználású anyagait (1999), valamint szakmai ismertető anyagát (2007) használtam fel.

Gravitációs iszapsűrítő: az előülepítőben és az utóülepítőben képződött szennyvíziszapot összekeverik és együtt kezelik tovább a fedett gravitációs iszapsűrítőben. A gravitációs erő következtében fellépő sűrítés az iszapsűrítés első fázisa. Az iszapsűrítés során keletkező iszapvizet visszavezetik a szennyvíztisztítási technológia legelejére. Az iszapsűrítőben keletkező kellemetlen szagot eredményező gázok megkötését biofilterrel oldották meg.

Gépi iszapsűrítő: az iszap további víztelenítését polielektrolit adagolása mellett iszapsűrítő asztalokon végzik.

Rothasztó tornyok: a sűrítést követően az iszap rothasztása következik. A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen jelenleg három, egyenként 2600 m³ térfogatú mezofil hőmérsékletű rothasztó torony és ezekhez tartozó szintén 2600 m³-es, nem kevert utórothasztó, továbbá egy darab 2000 m³-es termofil hőmérsékletű rothasztó működik. Az iszap rothasztása először a mezofil rothasztókban történik, majd a hulladék fogadóállomás pasztörizált hulladékával összekeverve az iszap egy részét termofil hőmérsékleten is tovább rothasztják.

Víztelenítő centrifugák: mind a mezofil hőmérsékletű, mind pedig a termofil hőmérsékletű rothasztás után a kirothadt iszap gépi víztelenítése víztelenítő centrifugákkal történik, amely elősegítése érdekében polielektrolitot adagolnak az iszaphoz. A víztelenítés eredményeképpen 28-30% szárazanyag tartalmú víztelenített, rothasztott iszap hagyja el a telepet, amely jelentős része hulladéklerakóra kerül. A hulladéklerakón a beszállított hulladék napi takarását oldják meg az iszappal. A víztelenített iszapnak csak 25%-a kerül mezőgazdasági hasznosításra, mint talajjótéltető anyag.

Iszapsziló: a víztelenített, rothasztott iszap tárolására szolgál.

Gázharang: a megtermelt biogáz tárolására szolgál.

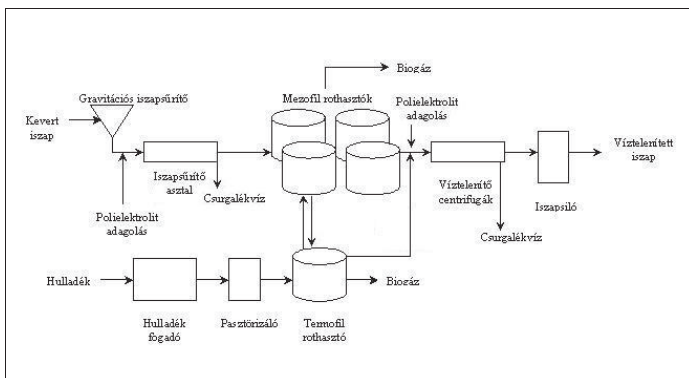
Kéntelenítés: a megtermelt biogázt folyékony, illetve szilárd töltetű kéntelenítő toronyokon vezetik át a gázmotorok védelme érdekében.

Gázmotorok, gázkazánok: a telepen 2 darab, egyenként 2 MW teljesítményű gázmotorban elektromos energiává alakítják a megtermelt biogázt, illetve meleg víz és fűtés előállítására céljából gázkazánban égetik el.

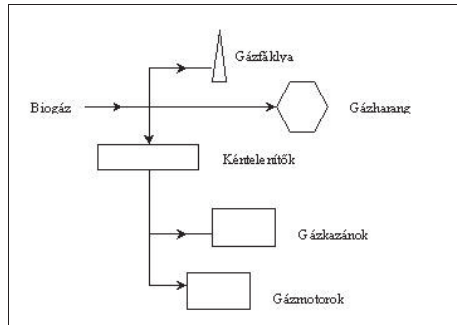
A telepen évi 22 millió m³ szennyvízből 18000 m³ víztelenített szennyvíziszap képződik, amely anaerob lebontásával 4,3 millió m³ biogáz képződik évente, amely átlag napi 9500 m³-nek felel meg. 1 m³ biogázból 2-2,5 kWh villamos energiát tudnak előállítani, 2,25 kWh-val számolva ez naponta 21375 kWh-t jelent, amely a mai árakon (2012) (25 forint/kWh) több mint 530000 forintot (534375 forint) jelent a cég számára.

A telep számára gazdaságilag előnyös, hogy biogázt termelnek, amelyből bevétel keletkezik a villamosáram-termelésnek köszönhetően. Azonban természetesen ennek vannak költség vonzatai is, a generátor fenntartási és amortizációs ráfordításai, a szükséges humán munkaerő költségei. Ezeket figyelembe véve megállapítható, hogy a biogáz termelés nem csupán bevételt termel, hanem bizonyos költséggel is jár, azonban ennek részletezése nem képezi a doktori munkámat. A 2011-es adatok szerint a biogázból megtermelt villamos energia éves szinten az összes villamos energia felhasználás 85%-át fedezi és a telep további szerves hulladékok fogadásával növelni szeretné biogáz termelését.

A 8. ábrán az iszapvonalai technológia folyamat ábrája látható, míg a 9. ábra a biogáz kezelés és hasznosítás folyamatát szemlélteti.



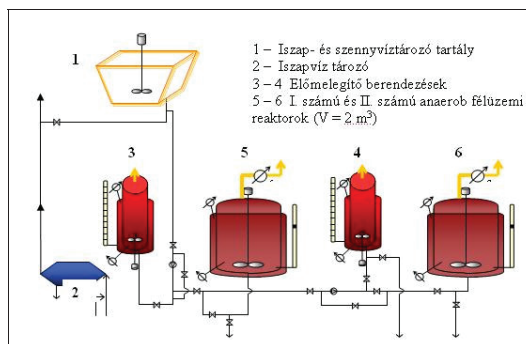
8. ábra: Az iszapvonalai technológia folyamatábrája (saját szerkesztés)



9. ábra: A biogáz kezelés és hasznosítás folyamatábrája (saját szerkesztés)

3.1.1.3. A félüzemi reaktorok

A telepen három darab félüzemi fermentor található. Mindegyik reaktor hasznos térfogata $2,0 \text{ m}^3$. A fermentorok külön-külön, illetve sorba kapcsolva is üzemeltethetők. Mindegyik reaktorhoz előmelegítést szolgáló 300 dm^3 -es tartály tartozik. Az I. és II. számú rothasztó tartály sorba kapcsolhatóságát csővezetékek és szivattyúk biztosítják. A két darab félüzemi méretű kísérleti berendezés kapcsolási vázlatát a 10. ábra mutatja be. A reaktorokban lehetőség van a hőmérséklet folyamatos, illetve reaktoronkénti változtatására is. A képződött gáz mennyiségének mérését a fermentorokhoz kapcsolódó gázórák biztosítják. A félüzemi fermentorok a 11. ábrán láthatók (az ábrán a harmadik fermentor nem látható).



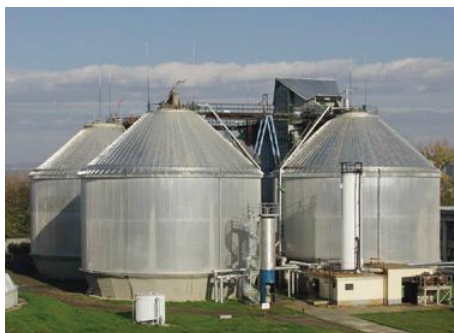
10. ábra: Félüzemi méretű anaerob rothasztó berendezés kapcsolási vázlata (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)



11. ábra: A félüzemi fermentorok (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)

3.1.1.4. Az üzemi fermentorok

A kísérleti munka helyszínéül szolgáló Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen három darab, tökéletesen kevert, egyenként 2600 m^3 -es mezofil és egy darab 2000 m^3 -es termofil iszapprothasztó torony található. A három mezofil hőmérsékletű üzemi fermentort egy ugyancsak 2600 m^3 -es nem kevert és nem fűtött utórothasztó követi. A mezofil hőmérsékletű ipari tornyokat a 12. ábra, míg a termofil hőmérsékletű fermentort a 13. ábra mutatja be.



12. ábra: Mezofil hőmérsékletű üzemi fermentorok, előtérben a kéntelenítő tornyok (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)



13. ábra: Termofil hőmérsékletű üzemi fermentor (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)

3.2. A telepen alkalmazott fizikai-kémiai paraméterek (ellenőrző paraméterek) meghatározása

3.2.1. Hőmérséklet mérése

Mind a félüzemi reaktorokban, mind pedig a mezofil és a termofil hőmérsékletű, ipari szintű fermentorokban beépített (online) hőmérséklet mérésre van lehetőség WTW Sintex elektródokkal.

3.2.2. Szárazanyag-tartalom meghatározása

A szárazanyag-tartalom meghatározására vonatkozó szabvány (MSZ 318-3:1979) alapján a bemért mintát vízfürdőn szárazra párolva, majd 105°C-on tömegállandóságig, de legalább 2 órán át szárítva a szárazanyag-tartalom mérhető.

3.2.3. Szervesanyag-tartalom meghatározása

A szervesanyag-tartalom meghatározására vonatkozó előírásokat szintén az MSZ 318-3:1979 szabvány tartalmazza. A meghatározás elve: a száraz maradékot 600°C-on legalább 3 órán keresztül izzítjuk, majd exikátorban hagyjuk kihűlni. Az így kapott szervesetlen mennyiségből (az összes szárazanyag-tartalom ismeretében) a szervesanyag-tartalom meghatározható.

3.2.4. A kémhatás meghatározása

A kémhatás meghatározása kombinált üvegelektóddal az MSZ 318-4:1979 szabvány alapján történt.

3.2.5. Az illósav meghatározása

Az illósav meghatározás a *Standard Methods* (Organic and volatile acids 1995) szerint történt. A meghatározás elve: 100 cm³ iszapmintához 5,0 cm³ koncentrált kénsavat (H₂SO₄) és 100 cm³ desztillált vizet adunk, majd ledesztilláljuk. A desztilláló lombikba 10 g vízmentes magnézium-szulfátot (MgSO₄) és néhány szem forrkövet is adni kell. A desztilláció után 150 cm³ desztillátumot 0,1 mol/dm³ koncentrációjú karbonátmentes nátrium-hidroxid-oldattal (NaOH) 3-4 csepp fenolftalein indikátor jelenlétében titráljuk a rózsaszín szín megjelenéséig. Az illósav mennyisége az alábbi képlettel számolható:

$$\text{illósav}(\text{mgCH}_3\text{COOH} / \text{dm}^3) = \frac{V(\text{NaOH}) * c(\text{NaOH}) * 60000}{V(\text{iszap}) * f} \quad (4)$$

A képletben a V(NaOH) a titrálás során fogyott NaOH-oldat térfogata cm³-ben, a c(NaOH) a NaOH-oldat koncentrációja mol/dm³ egységben, a V(iszap) a bemért iszap térfogata cm³-ben, az f pedig a visszanyerési faktor. A visszanyerési faktor ismert mennyiségű ecetsav-oldattal elvégzett desztillálást követően, a titrálás során kapott ecetsav koncentráció és a bemért ecetsav koncentráció hányadosa. Az ismert ecetsav-oldatot a mintával azonos módon desztilláljuk és titrálással visszamérjük ecetsav-tartalmát. Az összes illósavat, mint ecetsavat mgCH₃COOH/dm³ mértékegységben fejezzük ki.

3.2.6. A lúgosság meghatározása

A lúgosság meghatározása is a *Standard Methods* (Titration Method 1995) szerint történt. A meghatározás elve: 100 cm³ centrifugált iszapvizet 0,05 mol/dm³ kénsavoldattal folyamatos pH-mérés mellett pH = 3,7-ig titrálva a lúgosság kalcium-karbonátban (CaCO₃) megadva a következő módon számolható:

$$\text{lúgosság}(\text{mgCaCO}_3 / \text{dm}^3) = \frac{V(\text{H}_2\text{SO}_4) * c(\text{H}_2\text{SO}_4) * 50000}{V(\text{iszapvíz})} \quad (5)$$

A képletben a $V(\text{H}_2\text{SO}_4)$ a titrálás során fogyott kénsav-oldat térfogata cm^3 -ben, a $c(\text{H}_2\text{SO}_4)$ a kénsav-oldat koncentrációja mol/dm^3 egységben, a $V(\text{iszapvíz})$ pedig a bemért iszapvíz térfogata cm^3 -ben. Az eredményt $\text{mgCaCO}_3/\text{dm}^3$ egységben adjuk meg.

3.2.7. A gázmennyiség és gázösszetétel meghatározása

A képződött biogáz mennyisége minden fermentor esetén hitelesített gázórával mérhető. A gáz százalékos összetételének vizsgálata pedig Orsat-készülékkel történt az MSZ 5313-57 szabvány alapján, amely segítségével a biogáz szén-dioxid, szén-monoxid, oxigén, metán, kénhidrogén, hidrogén és nitrogén-tartalmának meghatározására nyílt lehetőség. A vizsgálat a gázkomponensek elnyelésén (abszorpcióján), illetve elégetésén alapszik. Az Orsat-készülék fényképe a 14. ábrán látható. A gázösszetétel ismeretében a metán/szén-dioxid arányt, mint számított ellenőrző paramétert használják.



14. ábra: Orsat-készülék (forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt, Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep Iszapvonali Laboratórium)

3.3. A telepen alkalmazott egyéb paraméterek meghatározása

3.3.1. Redoxipotenciál

A redoxipotenciál mérése a félüzemi reaktorokban online módon, a reaktorba beépített WTW Sentix ORP elektóddal történt.

3.3.2. Enzimaktivitás vizsgálatok

A kísérleti periódusok alatt négyféle enzimaktivitást vizsgáltam. Az enzimaktivitások mérési módszereinek részletes bemutatására a 4. fejezetben kerül sor.

3.4. Az adatok feldolgozásához és kiértékeléshez felhasznált módszerek

Az adatok feldolgozásához és kiértékeléséhez a *Microsoft® Office 2007 Excel* programján túl a korreláció analízishez a *PASW Statistics 18.0.0.* programját használtam. A diagramokat az Excel segítségével készítettem. A tendenciák érzékeltetése, a görbék lefutásának szemléltetése miatt az adatokat összekötve ábrázoltam, még azokban az esetekben is, amikor a mérési adatok folytonos vonallal történő jelölése matematikailag nem értelmezhető. Az adatok ezen bemutatását a tendenciák érzékeltetésén túl az indokolta, hogy így könnyebben áttekinthető a szennyvíztelepi üzemeltetés számára is. A képletek szerkesztését a MarvinSketch 5.6.0.4. programmal készítettem.

3.5. Számított paraméterek

3.5.1. Fajlagos szervesanyag terhelés

A fajlagos szervesanyag terhelés egységnyi idő alatt, az egységnyi reaktor térfogatra vonatkoztatott, a reaktorba betáplált szervesanyagot jelenti. Az alábbi képlettel számolható:

$$\text{fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m}^3 \cdot \text{d)} = \frac{Q \cdot C_0}{V(\text{reaktor})} \quad (6)$$

A képletben a Q a betáplált iszap térfogata m^3/d egységben, a C_0 az iszap szervesanyag tartalma kg/m^3 egységben, míg a V a reaktor térfogata m^3 -ben.

3.5.2. Fajlagos gázhozam és a gázösszetétel

Egy szubsztrát anaerob biológiai bonthatóságát sokszor a fajlagos gáztermeléssel jellemzik. A mérést szakaszos kísérleti körülmények között végzik. A teljes kirohadást feltételezve az adott szubsztrátra vonatkoztatva meghatározhatjuk a teljes lebontás mellett elérhető fajlagos gáztermelést. Folyamatos kísérleti berendezésben technológiai viszonyok mellett is kimérhető adott szubsztrát egységnyi tömegére vonatkoztatott gáztermelés. A fajlagos gáztermelést általában a reaktorban lebontott szervesanyagra vonatkoztatjuk, amely általában $0,75 - 1,12 \text{ m}^3/\text{kg}$ szervesanyag értékek között változik (Öllös et al. 2010).

A fajlagos gázfejlődés értéke és a gáz összetétele jellemző a rothasztott iszap anyagára. Az anaerob rothasztók ellenőrzése szempontjából azonban a metán/széndioxid arányt sokszor alkalmazzák a fentiekben tárgyalt egyéb paraméterekkel (pH, lúgosság, illósav) együtt az egyensúlyi folyamat jellemzésére.

A szubsztrát összetételében és koncentrációjában beálló változások kihatnak a rothasztó gáztermelésére. Ismeretes, hogyha különböző szubsztrátokat, például szénhidrátokat, zsírokat, illetve fehérjéket anaerob úton rothasztunk, akkor a biogázban a szén-dioxid-tartalom 50, 30, illetve 16% körül várható. Természetesen a fajlagos gáztermelés is változik a rothasztott anyag minősége alapján. Éppen ezért nem mondható ki általános szabályként valamilyen metán/szén-dioxid viszonyszám, és a fajlagos gáztermelésre sem vonatkoztatható törvényszerűség, illetve értéke nem adható meg szűk intervallumként.

3.5.3. PASW Statistics által számolt adatok

A statisztikai kiértékelések folyamán korrelációanalízist alkalmaztam, amelyeket SPSS programcsomaggal futattam le. Az $r(X,Y)$ lineáris korrelációs együttható alkalmas az X és Y változó közötti lineáris kapcsolat szorosságának mérésére. Röviden legtöbbször csak korrelációs együtthatónak nevezik. A mindig a -1 és +1 határok közé eső $r(X,Y)$ korrelációs együttható abszolút értéke az X és az Y közötti lineáris kapcsolat szorosságát méri, előjele a kapcsolat irányát mutatja. Ha az $r(X,Y) = 0$, nincs lineáris kapcsolat a két változó között. Az X és Y közötti kapcsolat annál szorosabb, minél nagyobb az r abszolút értéke. (Hunyadi és Vita 2008)

A korrelációs együtthatók mellett minden esetben megfigyeltem a szignifikancia szintek értékeit is. A szignifikancia szint a 0,05 – 0,10 közötti vagy esetleg még a 0,05-nél kisebb értéket veszi fel legtöbbször a gyakorlatban. Azokban az esetekben, amikor a szignifikancia szint ($p \leq 0,05$ vagy $p \leq 0,01$) nagyon kicsi volt, a két változó között korrelációt találtam. (Hunyadi és Vita 2003)

4. Kísérleti rész

A könnyebb áttekinthetőség érdekében először az enzimaktivitás vizsgálatok adaptálását és eredményeit, majd a félüzemi és üzemi körülmények között végzett kísérleti periódusokat, az ezekből nyert adatokat, valamint értékelésüket – kísérleti periódusokra bontva – együtt ismertetem.

4.1. Az enzimaktivitás vizsgálatok adaptálása anaerob iszapok jellemzésére

A következő fejezetben összefoglalom az enzimaktivitás vizsgálatokra vonatkozó módszerfejlesztési, illetve adaptálási kísérleteimet. A 2.5. fejezetben ismertett enzimaktivitás mérésekre vonatkozó szakirodalmak alapján mind a négyféle enzimaktivitás meghatározására alkalmazott módszert felülvizsgáltam, ellenőriztem. Minden esetben külön ismertetem azt a kiválasztott alapreceptet, amely a kiindulást jelentette a vizsgálataimhoz.

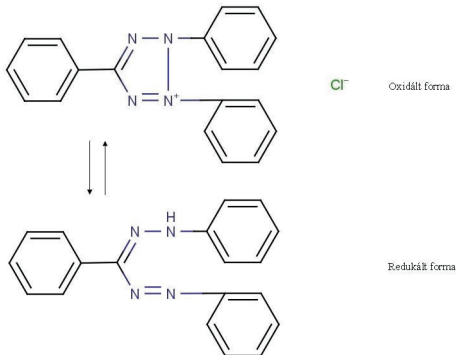
Kísérleti munkám során mind a négyféle enzimaktivitás vizsgálatra vonatkozóan elsősorban az alkalmazható iszap-szubsztrát koncentráció arányát, az inkubációs hőmérsékletet és időt változtattam.

4.1.1. A dehidrogenáz enzimaktivitás módszer adaptálása

A nemzetközi szakirodalmi adatok, illetve vizsgálati módszerek mellett először az ELTE TTK Analitikai Kémiai Tanszékén kidolgozott, eleveniszap mintákra vonatkozó dehidrogenáz enzimaktivitás receptet (*Melléklet 1.*), majd a „*Szennyvízzel, szennyvíziszappal kezelt mezőgazdaságilag hasznosított területek talajvizsgálata Talajbiológiai aktivitás vizsgálat dehidrogenáz enzimaktivitási módszerrel*” című MSz-08-1721/3-86 számú magyar szabványt részletesen vizsgáltam meg (*Melléklet 2.*). A szabvány az anaerob tulajdonságú talajmintákra, a kidolgozott recept pedig aerob eleveniszap mintákra vonatkozik, ezért ezeket az anaerob szennyvíziszap mintára adaptálni kellett.

Az enzim tevékenység jellemzésére szubsztrátként a 2,3,5-trifenil-terazólium-kloridot (TTC) alkalmaztam. A TTC szerkezeti képletét (oxidált forma) és a redukált 2,3,5-trifenil-formazán (TF) szerkezeti képletét a 15. ábra szemlélteti. A redoxireakcióban a központi gyűrűben a két nitrogénatom közötti kötés felhasad és így a keletkezett TF vegyületben már nem található kvaterner nitrogénatom. Az oxidált és a redukált állapotú vegyület közötti legfontosabb gyakorlati különbség a színük. A

képződött vörös TF mennyisége extrahálást követően spektrofotométerrel előzetes kalibráció után meghatározható (Neumüller 1981).



15. ábra: A lejátszódó redoxireakció alapja (saját szerkesztés)

Más redoxireakcióktól eltérően a 15. ábrán lejátszódó folyamatban a redukált forma vízben nem oldódik. Ebből a tényből két következtetést vonhatunk le: az első, amely szerint sejtek vagy szövetek vizsgálata esetén a redukált TF a képződés helyén marad (így megfelelő oldószerezrel extrahálni kell), ezáltal lehetővé válik a sejten vagy szövetben jelenlévő redukált forma meghatározása. Második következtetés, hogy a redukált forma kevésbé érzékeny az oxigén jelenlétére, ezért alkalmazható (alkalmazták is) aerob körülmények között is. A talajminták dehidrogenáz vizsgálata során metanol, míg az ELTE TTK korábbi receptjében butanol szerepel a biokémiai folyamatok megállítására, illetve a képződött TF extrahálására. Mind a metanol, mind a butanol rendkívül mérgező, ezért ezen oldószerek helyett etanolt alkalmaztam. Az oldószer lecserélése etanollá környezet- és munkaegészségügyi szempontból mindenképpen indokolt volt, figyelembe véve azt a hosszútávú célt, hogy majd a dehidrogenáz enzimaktivitás vizsgálat is bekerüljön napi szinten az üzemellenőrzési vizsgálatok közé.

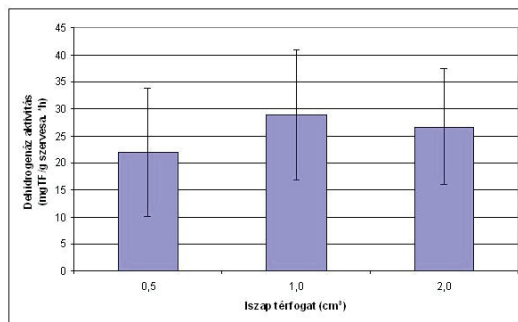
A meghatározás elve: a rohasztott szennyvíziszaphoz telített NaHCO_3 -ot, mint puffert, és TTC-t, mint szubsztrátot adtam. Ezt követően 1 órán keresztül 37°C -on inkubáltam a mintákat. Az élő sejtek enzimeit által katalizált folyamat eredményeképpen a TTC egy része átalakult vörös színű TF-ná. A keletkező vörös színű trifenil-formazán mennyisége arányos a sejtaktivitással, azaz megfelelő körülmények között jellemzi a lebontó folyamatok intenzitását. A biokémiai

folyamatokat etanollal állítottam le. Szűrést követően 485 nm-en mértem az oldat abszorbanciáját etanollal szemben. A kapott abszorbanciákat kalibrációs módszerrel értékeltem ki. A kalibrációs sorozat ismert koncentrációban tartalmazott trifenil-formazánt. Az aktivitást egységnyi szerves iszap által óránként képzett trifenil-formazán mennyiségében adom meg. A részletes recept a 3. mellékletben található.

A talajok dehidrogenáz vizsgálata során 3 g talajhoz 1 cm³ 3 m/m%-os TTC-oldatot, az eleveniszap dehidrogenáz aktivitására az ELTE TTK-n kidolgozott recept szerint 1,0 cm³ iszapmintához 1,0 cm³ 0,4 m/m%-os TTC-oldatot adtak szubsztrátként.

A mérési módszer kidolgozásakor először a szennyvíziszap minták térfogatait változtattam. A vizsgálataim során 0,5, 1,0 és 2,0 cm³ térfogatú mezofil fermentorokból származó iszapmintákkal végeztem a méréseket. A minták szárazanyag-tartalma 30,5 – 57,5 g/kg, míg szervesanyag-tartalma 15,5 – 33,5 g/kg között változott. Azt vizsgáltam, hogy a különböző térfogatú minták iszaptartalma és az 1 cm³ 1 m/m%-os TTC-oldat (szubsztrát) aránya megfelelő-e.

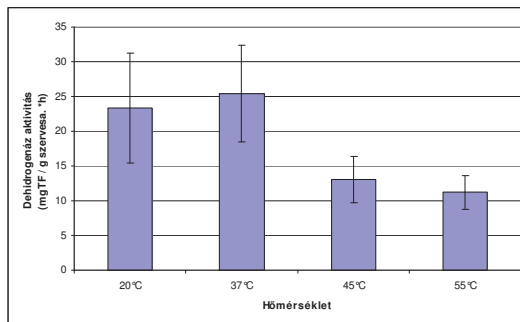
A különböző térfogatban alkalmazott minták abszorbanciái értelemszerűen a térfogat növekedésével nőttek, de nem lineárisan (16. ábra). Némelyik mintának – főleg a 2 cm³ iszapot tartalmazó és nagy szervesanyag-tartalmú mintáknak – olyan nagy lett az abszorbanciája, hogy a spektrofotométer mérési tartományán kívül esett, így hígítanom kellett az oldatokat. A hígítás a szennyvíztisztító telepi laboratóriumok számára napi rutin vizsgálat esetén nem szolgáltatna hiteles adatot, mert nem megfelelő ekkor már az iszap és a TTC aránya. A hígítás elkerülése, és a rutinszerűen alkalmazható, megbízható mérés érdekében a vizsgált minták szárazanyag- és szervesanyag-tartalma alapján megállapítottam az enzimaktivitás mérési módszer körülményei közt alkalmazható szárazanyag és szervesanyag koncentráció intervallumot. A kísérlet során alkalmazott 1 cm³ 1 m/m%-os TTC / 1 cm³ iszap arány esetén 1,22 – 2,10 g/kg szárazanyag-tartalom, illetve 0,62 – 1,22 g/kg szervesanyag-tartalom mellett volt biztosítható a leírt vizsgálati módszer (megbízhatóan mérhető adatokat kaptam, s a mintákat sem kellett hígítanom). Megállapítottam, hogy 1 cm³ 1 m/m%-os TTC-oldat esetén a megfelelő iszaptérfogat az előbbi koncentráció intervallumon belüli minták esetén 1 cm³ volt. A mérési eredményeket a 4. melléklet tartalmazza.



16. ábra: A dehidrogenáz aktivitás változása az alkalmazott iszap térfogat függvényében 37°C-on (1 h inkubálás, n=20)

A 16. ábra alapján megállapítható, hogy a vizsgálat során nyert átlagos dehidrogenáz adatok szerint a 2 cm³ iszap térfogat bemérés mellett már fajlagosan kisebb átlagos TF koncentrációt mértem.

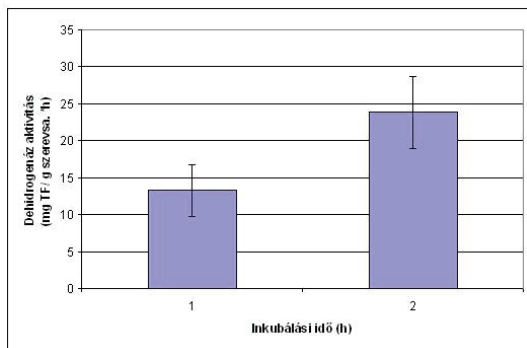
A kísérletek során változtattam az inkubálási hőmérsékletet is. A következő hőmérsékleteken is végeztem kísérleteket: szobahőmérsékleten (átlag 20°C), valamint 45°C és 55°C-on. Ezen hőmérsékleteken kapott abszorbancia adatokat hasonlítottam össze az eredetileg javasolt, 37°C hőmérsékleten kapott értékekkel. Az inkubálási hőmérséklet emelésével (20°C-ról 37°C-ra) a növekvő enzimtevékenységet a megnőtt abszorbancia értékek jelezték. A legnagyobb abszorbancia értékeket 37°C-on tapasztaltam. A 45°C-os, illetve az 55°C-os inkubálás kedvezőtlen hatását csökkent enzimtevékenység jelezte (17. ábra). A mérési adatok a 4. mellékletben találhatók.



17. ábra: A dehidrogenáz aktivitás változása a hőmérséklet függvényében 1 cm³ iszap bemérés esetén (1 h inkubálás, n=20)

A 20 minta átlag és szórás adatai alapján megállapítottam, hogy a 37°C-on inkubált minták esetén tapasztalható a legnagyobb fajlagos dehidrogenáz aktivitás.

Az inkubálási idő hatását is vizsgáltam, annak ellenére, hogy a szakirodalomban közöltek szerint (Miksch 1985, 1988) nincsen nagy jelentősége az inkubálási időnek. Az általánosan elfogadott 1 órás inkubálási időt vizsgálataim során 2 órára emelve megállapítható, hogy közel kétszeres mennyiségű TF képződött (18. ábra).

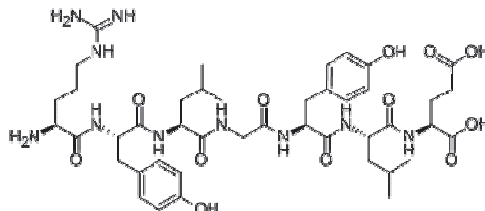


18. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás változása az inkubációs idő függvényében 1 cm³ iszaptérfogat esetén 37°C-on (n=20)

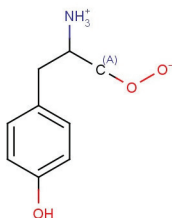
A szakirodalmak áttanulmányozása (a dehidrogenáz enzimaktivitás mennyiségét mindig 1 órára vonatkoztatják), illetve a szennyvíztelepi laboratóriumok kapacitását (egyszerűen az idővesztéséget és az aktivitás adatok összehasonlíthatóságát) figyelembe véve az inkubálási idő növelése mért adataim alapján nem indokolt, mivel 1 óra inkubálás utáni mintákra is megbízható adatok nyerhetők. Az általam kidolgozott részletes receptet a 3. melléklet, a dehidrogenáz enzimaktivitás módszer körülményeinek vizsgálatakor nyert eredményeket pedig a 4. melléklet tartalmazza.

4.1.2. A proteáz enzimaktivitás módszer adaptálása

A proteáz enzimaktivitás meghatározásához Thiel és Hattingh (1967) módszerét vettem alapul, amely anaerob iszappminták proteáz enzimaktivitásának mérését ismerteti. A szennyvíziszap mintákhoz szubsztrátként kazein-oldatot adunk és a proteáz hatására L-tirozin szabadul fel. Az L-kazein szerkezetét a 19. ábra, míg a képződött L-tirozin szerkezetét a 20. ábra szemlélteti.



19. ábra: L-kazein szerkezete (saját szerkesztés)



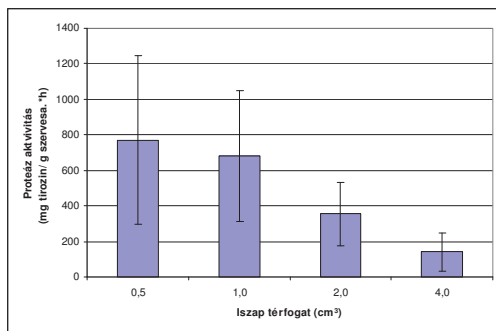
20. ábra: Az L-tirozin (Tyr, T) szerkezete (saját szerkesztés)

A meghatározás elve: a fehérjék (L-kazein) aminosavvá (L-tirozin) alakulásának követése. Az eredeti recept szerint a kísérletben minden minta 1/3-térfogatrész anaerob iszapmintát, 1/3-térfogatrész szubsztrátot (0,25 m/m%-os L-kazein-oldat), illetve 1/3-térfogatrész desztillált vizet tartalmazott. 1 óra szobahőmérsékleten történt inkubálás után a reakciót triklórecetsavval állították le. A triklórecetsav hatására történő kicsapódás miatt a mintákat szűrni kell, majd a szűrést követő lúgosítás után, a kiváló vascsapadék miatt a mintákat újra le kell szűrni. Ezt követően Folin-reagenst adva a mintákhoz a kialakuló kék színt 660 nm-en a vak mintával szemben mérhető (a vakminta abszorbanciáját nullának véve). Vakmintaként a fenti arányokban kezelt anaerob iszap szolgál azonnali triklórecetsavas kezelést követően. A mért adat mg tirozin/g szervesanyag *h egységben adható meg.

A proteáz enzimaktivitás vizsgálatok esetében is változtattam az iszapminta térfogatán (0,5; 1,0; 2,0 és 4,0 cm³ iszapmintát használtam) a megfelelő iszap-szubsztrát arány elérése érdekében. A mezofil hőmérsékletű rothasztóból származó iszapminták

35,0 – 57,5 g/kg szárazanyag-, illetve 20,5 – 33,5 g/kg szervesanyag-tartalommal rendelkeztek.

A proteáz aktivitás vizsgálataim alapján az alkalmazott szubsztrát (2 cm^3 0,25 m/m%-os kazein-oldat) esetén a 2 cm^3 -es iszapminta térfogat volt a legmegfelelőbb, mert a mérések során kisebb szórást tapasztaltam, azaz jobban reprodukálható a mérés. A minta teljes térfogata így 6 cm^3 -nek (2 cm^3 iszap, 2 cm^3 szubsztrát, 2 cm^3 desztillált víz) adódott. A $0,5\text{ cm}^3$ és az 1 cm^3 térfogatú iszapmintákkal történt vizsgálatok során rendre kis abszorbancia ($A < 0,1$) értékeket kaptam, így ezek – bár fajlagosan nagyobb tirozin aktivitás értéket adtak – a nyert adatok nem voltak megbízhatóak (21. ábra). A mérési adatokat a 6. melléklet tartalmazza.



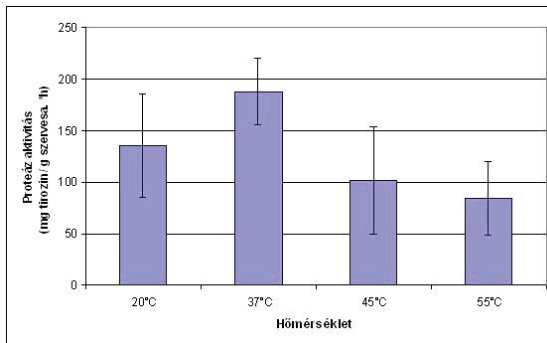
21. ábra: A proteáz aktivitás változása az alkalmazott iszaptérfogat függvényében 37°C-on (1 h inkubálás, n=13)

A 4 cm^3 iszapot tartalmazó minták nem csupán a fajlagosan igen kis aktivitás értékek miatt, hanem a később sorra kerülő szűrési lépések miatt sem kedvezőek, a triklórécetsavas kicsapást követően a szűrési idő esetükben ugyanis jelentősen megnőtt.

Másik kísérletsorozatban az inkubálási hőmérsékletet változtattam meg, az alkalmazott hőmérsékletek ez esetben is a szobahőmérséklet (átlag 20°C), a 37°C , a 45°C , az 55°C volt.

Tapasztalataim alapján a 37°C hőmérséklet volt a legkedvezőbb, mind az aktivitás, mind a reprodukálhatóság tekintetében. Az inkubálási hőmérséklet szobahőmérsékletéről 37°C -ra történő megemelésével értékelhetőbb adatokat (nagyobb és ezért megbízhatóbb abszorbancia), azaz nagyobb enzimaktivitás értékeket kaptam. A 45°C és 55°C -os inkubálás során kapott adatok nem voltak megbízhatóak, ugyanis

ezeken a hőmérsékleteken mind a kazein, mind a képződő tirozin kicsapódása jelentős (22. ábra).



22. ábra: A proteáz aktivitás változása a hőmérséklet függvényében 2 cm³ iszaptérfogat esetén (1 h inkubálás, n=13)

Vizsgáltam továbbá a triklórecetsav, illetve a triklórecetsavas kicsapás utáni lúgosítás megfelelő mértékét is, a mérés során beállítandó pH-t optimaltám. A Folin-reagens hozzáadása után azonnal megjelenik a kék szín, amely 660 nm-en mérhető. Megvizsgáltam a kék szín stabilitásának időfüggését is, mely során 40 percen keresztül vizsgáltam a kék szín intenzitásváltozását.

A mérések során kezdetben problémák jelentkeztek a triklór-ecetsavas kicsapás során és a kialakuló kémhatásban. Inkubálás után az eredeti recept szerint 10 m/m%-os triklórecetsav-oldattal kell leállítani a reakciót, ami kevésnek bizonyult, ezért töményebb oldatokkal kísérleteztem. Ennek során 15 és 20 m/m% triklórecetsavval próbálkoztam. A reakció leállítására a 15 m/m% töménységű oldat bizonyult megfelelőnek, ezért a további méréseket ezzel végeztem.

A következő probléma a triklór-ecetsavval történő kicsapás utáni szűrőkor adódott, mivel szűrés után több esetben opálos oldatokat kaptam. Ezt a problémát megpróbáltam vákuumszűréssel kiküszöbölni. A vákuumszűréssel a nagyon időigényes szűrés is lerövidíthető. A szűrés elősegítésében a megfelelő pórusméretű szűrőpapír kiválasztásának is lényeges szerepe volt. Ez az opalitás egyébként a szűrés után NaOH hozzáadásával megszűnt, ezért az előzetes vákuumszűrés használata nem szükséges, a továbbiakban nem is alkalmaztam.

A további kémhatás problémák a nem megfelelő koncentrációjú (eredeti recept szerint $0,5 \text{ mol/dm}^3$) NaOH-oldatból és a túl savas Folin-reagensből ($\text{pH} = 2-3$) adódtak. Ennek kiküszöbölésére töményebb NaOH-oldatot, azaz $1,0$, $1,5$, illetve $2,0 \text{ mol/dm}^3$ koncentrációjú oldatokat alkalmaztam. A kísérletek során a pH beállításához az $1,0 \text{ mol/dm}^3$ NaOH-oldat megfelelőnek bizonyult. A $2,0 \text{ mol/dm}^3$ NaOH-oldat hatására már túl nagy kémhatású oldatot kaptam, ami a Folin-reagens $10-12$ közötti pH -n történő reakcióját akadályozta. Az oldat ez esetben opálossá is vált. A Folin-reagens hígításával is próbálkoztam, de a töményebb ($1,0 \text{ mol/dm}^3$) NaOH-oldat használata mellett az eredeti töménységű ($1:1$ hígítású) Folin-reagens is megbízhatóan adta a színreakciót.

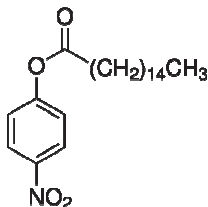
A Folin-reagens hozzáadásával kék színű oldat alakul ki. Az eredeti recept szerint három percen belül kell lemérni az oldat fényelnyelését, de kísérleteim szerint ennyi idő alatt nem stabilizálódik az oldat kék színe. Ezért vizsgáltam a kék szín stabilitásának időfüggését. Ezt a kísérletet 40 percen keresztül végeztem. A mérések során arra a következtetésre jutottam, hogy a kék szín a Folin-reagens hozzáadása után kb. 15 perc elteltével stabilizálódik. A mért abszorbancia értékek folyamatosan, 15 percig nőttek, majd ezután kissé csökkentek, ezért 15 perc eltelte után vizsgáltam az aktivitást. Az adatokat a *6. melléklet* tartalmazza.

Összefoglalva az eredeti receptben szereplő 10 m/m\% triklórsav koncentráció nem bizonyult elegendőnek, ezért helyette 15 m/m\% koncentrációt használtam a kísérleteim során a folyamat leállítására. Az $1:1$ hígítású Folin-reagens alkalmazása miatt a mintákat lúgosítani kellett, ezért 1 mol/dm^3 -es NaOH-oldatot alkalmaztam a Folin-reagens hozzáadása előtt. A kialakuló kék szín időfüggésének vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a kék szín kb. 15 perc elteltével mérhető megbízhatóan. Az általam alkalmazott részletes receptet az *5. melléklet* tartalmazza. A proteáz mérési módszer beállítására végzett vizsgálatok eredményeit pedig a *6. melléklet* tartalmazza.

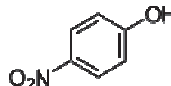
4.1.3. A lipáz enzimaktivitás módszer adaptálása

A lipáz enzimaktivitás méréshez Vorderwülbecke et al. (1992), valamint Li és Chróst (2006) munkáit használtam fel alapként. A meghatározás elve, hogy a szubsztrátként jelenlévő para-nitro-fenil-palmitát (PNFP) (*23. ábra*) az enzimfolyamatok során para-nitro-fenollá (PNF) alakul (*24. ábra*), amely spektrofotometriásan mérhető. A méréshez szubsztrátként két reagens-oldat emulzióját (propanolos para-nitro-palmitát, illetve Triton-X, gumiarábikum és TRIS-HCl) készítettem el, amelyet a lecentrifugált iszap felülúszójának meghatározott részletéhez

adtam. Inkubálást követően a minta fényelnyelését a vakkal szemben 410 nm-en mértem (a vakminta abszorbanciáját nullának véve). Az aktivitás 1 g szerves iszap által óránként előállított para-nitro-fenol mértékegységben adható meg. A részletes receptet a 7. melléklet tartalmazza.

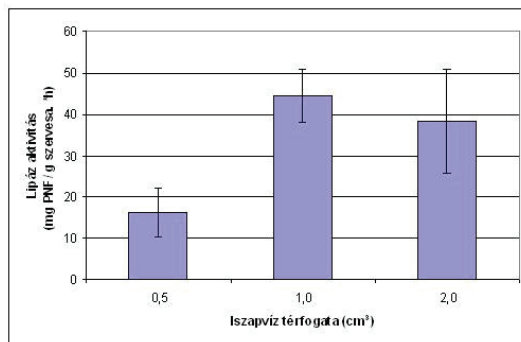


23. ábra: A p-nitro-fenil-palmitát szerkezete (saját szerkesztés)



24. ábra: A p-nitro-fenol szerkezete (saját szerkesztés)

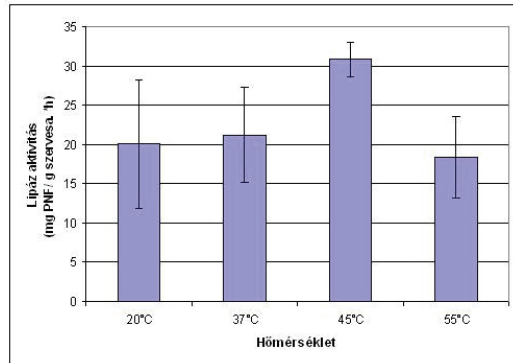
A szennyvíziszapból centrifugált iszapvízből változó térfogattal (0,5 cm³, 1,0 cm³ és 2,0 cm³) és mindig azonos szubsztrát térfogattal (4,0 cm³) végeztem el a megfelelő iszapvíz-szubsztrát arány megállapítását. Az iszapminták mezofil hőmérsékletű rothasztóból származtak, a szárazanyag-tartalom 28,5 – 37,0 g/kg, a szervesanyag-tartalom 14,0 – 18,0 g/kg között változott.



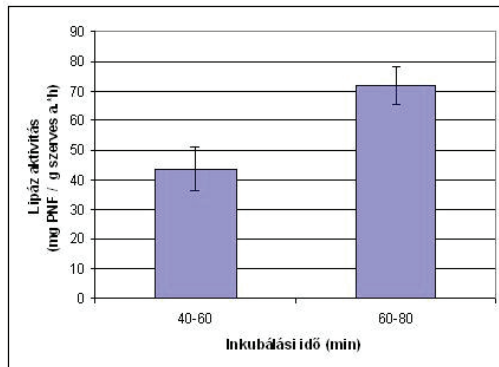
25. ábra: A lipáz aktivitás változása az alkalmazott iszapvíz térfogat függvényében 45°C-on (1 h inkubálás, n=10)

A lipáz aktivitás 1,0 cm³ minták esetén volt a legkisebb szórás mellett a legnagyobb (25. ábra). A lipáz enzimaktivitás vizsgálataim eredményeképpen

megállapítottam, hogy az aktivitás és a reprodukálhatóság miatt a megfelelő inkubálási hőmérséklet a 45°C (26. *ábra*), az optimális inkubálási idő pedig 60-80 perc között volt (27. *ábra*).



26. *ábra*: A lipáz aktivitás változása hőmérséklet függvényében 1 cm³ iszapvíz térfogattal (1 h inkubálás, n=10)

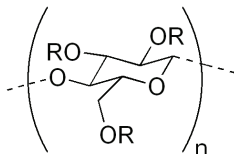


27. *ábra*: A lipáz aktivitás változása inkubálási idő függvényében 1 cm³ iszapvíz térfogattal (1 h inkubálás, n=10)

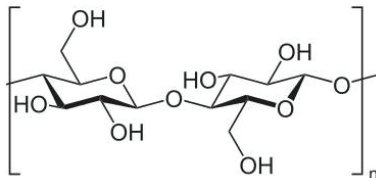
Az általam alkalmazott részletes receptet a 7. *melléklet* tartalmazza. A lipáz enzimaktivitás módszer beállítása céljából végzett vizsgálatok eredményeit pedig a 8. *melléklet* tartalmazza.

4.1.4. A celluláz enzimaktivitás módszer adaptálása

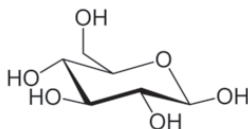
A celluláz enzimaktivitás mérésénél Lee et al. (2002) és Rivard et al. (1994) vizsgálatait szolgáltatt kiindulásként. A mérés során a rothasztott iszap cellulóz lebontó képességét vizsgáljuk 24 órás inkubálás alatt, 37°C-on, az iszapminta egy részéhez könnyen bomló cellulóz származékot (karboximetil-cellulóz, CMC) adva. A karboximetil-cellulóz (28. ábra) a cellulóz (29. ábra) karboximetil-észtere: a cellulózban található egyes hidroxil-csoportokban (-OH) lévő hidrogént karboximetil-csoporttal (-CH₂COOH) helyettesítik, így -OCH₂COOH-t kapva. Az inkubáció után a szuszpenziót lecentrifugáltam. A centrifugátumban a cellulóz származékokból felszabadult glükózt (30. ábra) dinitro-szalicilsav (DNSz) reagens hozzáadásával határoztam meg. A reakció során a minta megbarnul, amely 550 nm-en fotometrálnak. Az iszap saját lebontásából származó glükózt szubsztrátot nem tartalmazó vakmintával korrigáltam. A kiértékelést glükóz kalibrációval végeztem. Az aktivitás egységnyi szerves iszap által felszabadított glükóz mennyiségében adható meg. A részletes recept a 9. mellékletben található.



28. ábra: A karboximetil-cellulóz (CMC) szerkezete (R = H vagy CH₂COOH, n = polimerizációfok) (saját szerkesztés)



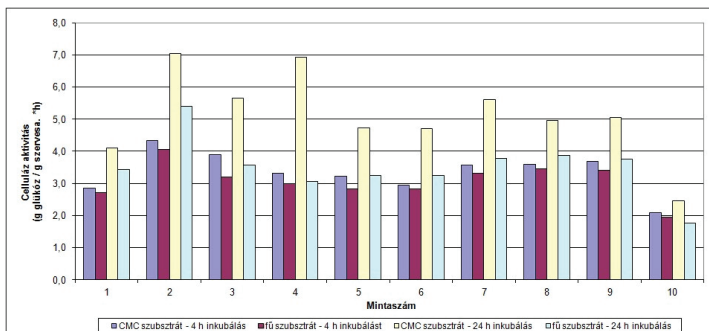
29. ábra: A cellulóz szerkezete (n = polimerizációfok) (saját szerkesztés)



30. ábra: A glükóz szerkezete (saját szerkesztés)

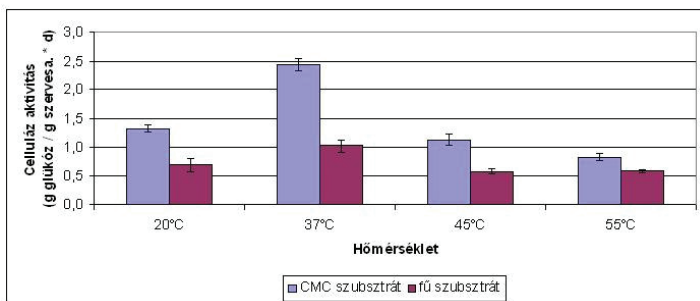
A celluláz aktivitás vizsgálatok során a minták egyik részéhez a könnyen bontható CMC szubsztrátot, míg másik részletéhez szubsztrátként előzetesen tömegállandóságig szárított, aprított, darált fűvet adtam és vizsgáltam a fű bonthatóságát. Az előkezelt fű, mint szubsztrát alkalmazását az indokolta, hogy fűüzemi kísérletek során a szennyvíziszap és a felszíni vízfolyások mellől lekaszált fű együttes (koszubsztrát) rothasztását is vizsgáltam. A celluláz enzimaktivitás méréseket minden esetben 37°C hőmérsékleten végeztem 5,0 cm³ iszapot használva fel mintaként. Minden vizsgálat során az inkubációt követően a szakirodalmaknak (Lee et al. 2002, Rivard et al. 1994) megfelelően a mintákat lecentrifugáltam és a centrifugátum glükóz koncentrációját határoztam meg. A kísérletekhez felhasznált, mezofil hőmérsékletű rothasztóból származó szennyvíziszap szárazanyag-tartalma 28,0 – 47,5 g/kg, míg szervesanyag-tartalma 15,5 – 30,5 g/kg volt.

Az előzetes várakozásoknak megfelelően 37°C-on a CMC bonthatósága kedvezőbb, mint a fű bonthatósága. Ezt igazolják minden minta, illetve a 4 órás és a 24 órás inkubálási idő esetén is a CMC szubsztrát alkalmazásakor a fűhöz képest mért nagyobb celluláz aktivitások. Megjegyezendő, hogy a 4 órás inkubálási idő kevésnek tekinthető a megfelelő mértékű lebontáshoz, ezt az adott szubsztrátra nyert kisebb celluláz enzimaktivitások is jelezték (31. ábra). Inkubálási időnek ezért 24 órát javaslok, amely még megfelelően kivitelezhető egy átlagos szennyvíztelepi laboratórium számára is.



31. ábra: A celluláz enzimaktivitások változása 4 és 24 órás inkubálási idő alatt CMC, illetve előkezelt fű szubsztrát esetén 37°C-on (n=10)

Kísérleteim során vizsgáltam az inkubálási hőmérséklet változásának hatását is. A vizsgált hőmérsékletek: szobahőmérséklet (átlag 20°C), 37°C, 45°C, 55°C. Mindkét szubsztrát esetén a 37°C-os inkubálási hőmérséklet esetén tapasztaltam a legnagyobb enzimtevékenységet (32. ábra).



32. ábra: A celluláz enzimaktivitások változása a hőmérséklet függvényében 24 órás inkubálási idő alatt CMC, illetve előkezelt fű szubsztrát esetén (n=10)

Az általam alkalmazott részletes receptet a 9. melléklet tartalmazza. A celluláz enzimaktivitás módszer körülményeinek vizsgálata során nyert eredményeket pedig a 10. melléklet tartalmazza.

4.2. Az enzimaktivitás módszerek adaptálásakor nyert eredmények összefoglalása

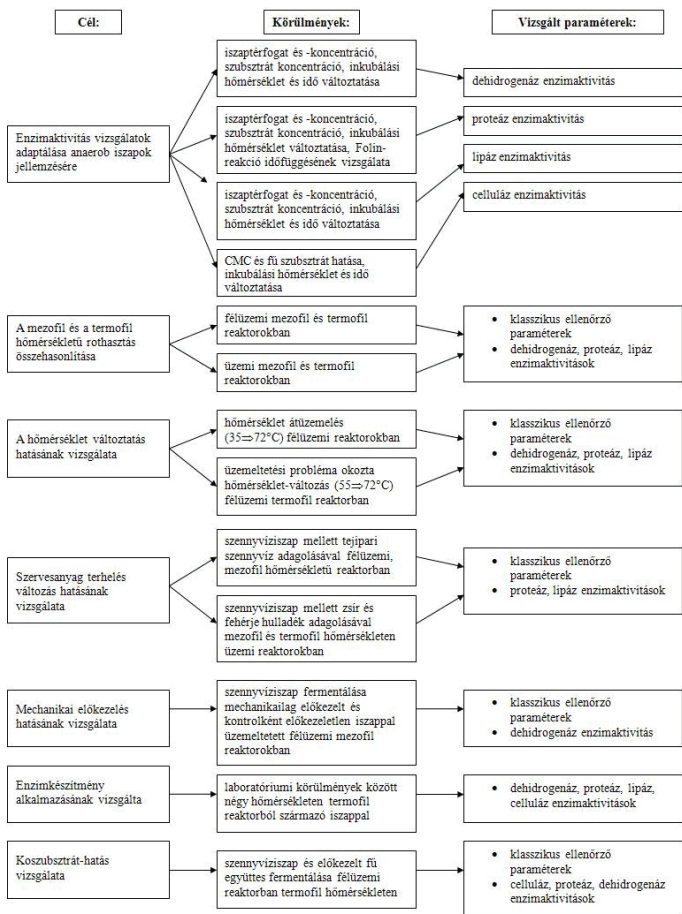
Összefoglalásképpen a 12. táblázatban ismertetem az enzimaktivitások meghatározására alkalmazott módszerekre vonatkozó módosítási tapasztalataimat.

12. táblázat: Az enzimaktivitás mérések vizsgálati körülményeinek összefoglalása

	Szubsztrát	Anyagsere- termék	Iszap térfogat (cm ³)	Inkubálási hőmérséklet	Egyéb
Dehidrogenáz	2,3,5-trifenil- tetrazólium- klorid	trifenil- formazán	1	37°C	-
Proteáz	kazein	tirozin	2	37°C	15 m/m% triklórecetsav, 2 mol/dm ³ NaOH adagolás
Lipáz	p-nitro-fenil- palmitát	p-nitro-fenol	1 (iszapvíz)	45°C	-
Celluláz	karboximetil- cellulóz, illetve szárított, aprított fű	glükóz	5	37°C	24 óra inkubálás

4.3. A kísérleti periódusok bemutatása

Kísérleti munkám céljait, körülményeit és a vizsgált paramétereket a 33. ábrán foglaltam össze. Kutatásaim során az enzimaktivitás vizsgálatok módszereinek adaptálásán túl hat kísérleti főperiódust különítettem el, amelyek között félfüzemi és üzemi kísérletek is voltak.



33. ábra: Kísérleti periódusok összefoglalása

4.3.1. A mezofil és a termofil rothasztás enzimaktivitásának összehasonlítása félüzemi és üzemi reaktorokban

4.3.1.1. A félüzemi kísérletsorozat bemutatása

A félüzemi körülmények közötti vizsgálatok mind a mezofil hőmérsékleten, mind pedig a termofil hőmérsékleten 30 napig tartottak. Ez idő alatt közel azonos

fajlagos szervesanyag terhelést biztosítottunk a két vizsgált félüzemi fermentorban. A kísérleti periódus üzemeltetési paramétereinek átlag értékeit és szórás adatait a 13. táblázatban foglaltam össze. Az üzemeltetési paraméterek értékei a szakirodalmakban megtalálható intervallumokon belüliek voltak.

13. táblázat: A félüzemi kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=30) a mezofil, illetve a termofil hőmérsékletű reaktorban

Paraméterek	Mezofil rendszer	Termofil rendszer
Hőmérséklet (°C)	35,1±0,4	55,1±0,4
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	0,69±0,31	0,70±0,37
Hidraulikus tartózkodási idő (d)	25±1,6	13±0,7

A kísérleti periódus alatt a klasszikus ellenőrző paramétereket az iszap szárazanyag-tartalmát, a szervesanyag-tartalmát, a kémhatást, az összes illó zsírsavat (illósav), a lúgosságot, a gázösszetételt, redoxipotenciált, illetve a dehidrogenáz, a proteáz, a lipáz enzimaktivitásokat vizsgáltam, valamint korrelációs vizsgálatokat végeztem a szervesanyag terhelés, a fajlagos gázmennyiség és a mért enzimaktivitások között.

4.3.1.1.1. A félüzemi kísérletsorozat eredményei

A 14. táblázatban feltüntetett paraméterek szórás-százalék (RSD%) értékei, valamint az üzemeltetési tapasztalatok alapján megállapítható, hogy a mezofil kísérleti fermentor működése ingadozóbb, kiegyensúlyozatlanabb volt. Ezt támasztja alá a fajlagos gázmennyiség és a metán mennyiségének alakulása is. A fajlagos gázmennyiség a termofil hőmérsékletű fermentorban a mezofil hőmérsékletű gáztermelés átlagához képest 276%-ra növekedett (a mezofil átlag 600±398 Nm³/1000kg szervesa., míg a termofil átlag 1660±652 Nm³/1000kg szervesa.). A biogáz metántartalma a mezofil hőmérsékleten átlag 57,5±6,1%, míg a termofil hőmérsékleten átlag 62,8±8,8%, ez átlagosan 9,2% metántermelés növekedést jelent (a mezofil metántermelés átlag 345±201 Nm³/1000kg szervesa., míg a termofil 1042±364 Nm³/1000kg szervesa.).

14. táblázat: Az üzemellenőrzési paraméterek és az enzimaktivitások változása mezofil és a termofil rendszerben, félüzemi körülmények között a 30 napos kísérleti periódus ideje alatt (n=30)

Paraméter	Mezofil rendszer		Termofil rendszer	
	Átlag	RSD%	Átlag	RSD%
Fajlagos gázmennyiség (Nm ³ /1000kg szervesa.)	600	66,5	1660	39,3
A biogáz metántartalma (%)	57,5	11,0	62,8	8,8
Metán mennyisége (Nm ³ /1000kg szervesa.)	345	38,4	1043	35,0
pH	6,9	6,2	7,3	5,8
Lúgosság (mgCaCO ₃ /dm ³)	6094	14	5924	13
Illósav (mgCH ₃ COOH/dm ³)	1680	76	1846	29
Redoxipotenciál (mV)	- 457	9,4	- 506	10,9
Dehidrogenáz (mg TF/g szervesa. *h)	14,0	17,6	16,8	12,4
Proteáz (mg tirozin/g szervesa. *h)	153	39,8	193	30,2
Lipáz (mg PNF/g szervesa. *h)	1,4	41,2	1,9	31,6

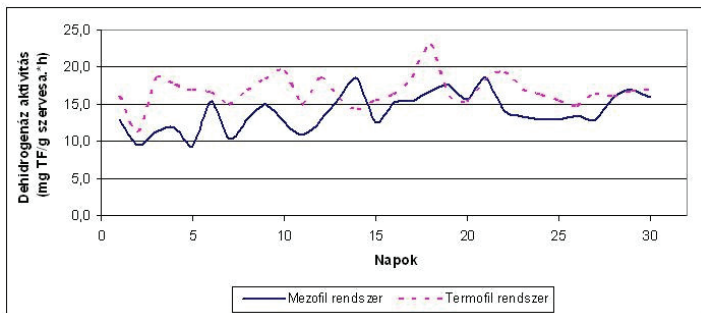
A klasszikus ellenőrző paraméterek közül a kémhatás ugyan kis mértékben változott, de a mezofil hőmérsékletű fermentorban a kísérleti periódus teljes ideje alatt 17 esetben a mért kémhatás az optimálisnak tartott pH=7,2 érték alatt volt. A termofil hőmérsékletű fermentorban csak a kísérletsorozat kezdetén (az első 7 nap) volt az optimális érték alatti kémhatás.

A kémhatás, az illósav és a lúgosság, mint a legfontosabb üzemellenőrző paraméterek a kísérleti periódus ideje alatt rendszertelenül változtak, az üzemeltetés számára nem jelezték egyértelműen a fermentorokban lejátszódó változásokat.

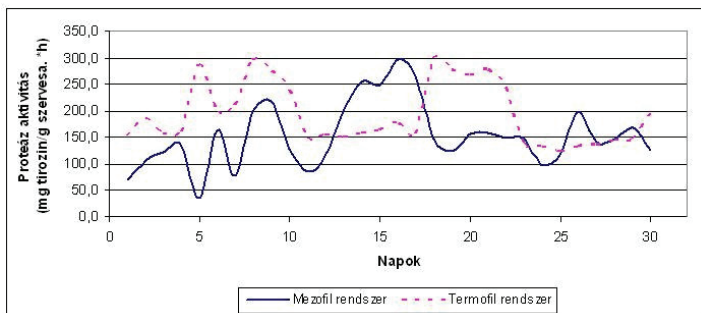
Az illósavak koncentrációjának alakulása mind a termofil, mind a mezofil rothasztóban ingadozó értéket mutatott, bár a termofil rothasztóban ez az ingadozás kisebb mértékű volt. A rendszer puffereképességét biztosító lúgosság értékek is a mezofil rendszerben mutattak valamivel nagyobb változást. Mindkét fermentorban a lúgosság-koncentráció átlagértékei az optimálisnak tekintett értékeket meghaladták. A mért redoxipotenciál értékek a mezofil hőmérsékletű rendszer esetén a szakirodalomnak megfelelő intervallumon belül változtak, míg termofil hőmérsékletű rothasztás esetén a mért értékek az optimális értékeknél kisebbek voltak. A mérés pontosságát nehezítették

az elektróda karbantartásából adódó nehézségek, hiszen a szennyvíziszap folyamatosan elszennyezte az elektródát, amelynek megtisztítása az anaerob fermentor esetén komoly probléma. A további kísérleti periódusokban a redoxipotenciál mérésétől az előbb ismertett bizonytalanságok miatt eltekintettem.

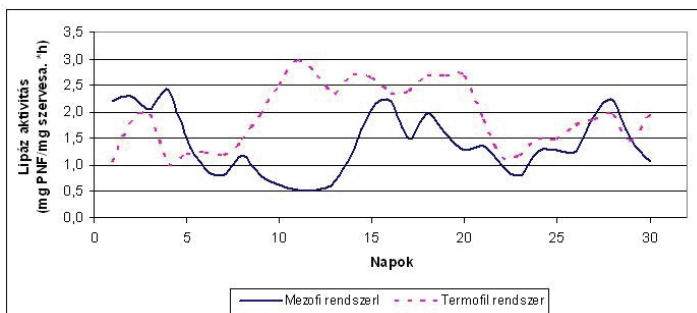
A két fermentorban mért enzimaktivitasokat a 34., 35. és 36. ábrák mutatják be. Mindhárom ábráról megállapítható, hogy a mezofil hőmérsékletű rendszerhez képest a termofil hőmérsékletű rendszer átlagos dehidrogenáz, átlagos proteáz és átlagos lipáz enzimaktivitásai a jelentős fajlagos szervesanyag terhelés változás mellett is nagyobbak voltak.



34. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás változása a kísérleti periódus alatt félüzemi rendszerben



35. ábra: A proteáz enzimaktivitás változása a kísérleti periódus alatt félüzemi rendszerben



36. ábra: A lipáz enzimaktivitás változása a kísérleti periódus alatt félüzemi rendszerben

A vizsgált enzimaktivitások és a fajlagos szervesanyag terhelés kapcsolatát a 37. – 42. ábrák mutatják be. A bemutatott ábrák és a korreláció vizsgálatok alapján megállapítható, hogy mezofil és termofil hőmérsékleten a fajlagos szervesanyag terhelés és a vizsgált enzimaktivitások ok-okozati összefüggésben állnak egymással. Mindkét vizsgált hőmérsékleten ez a korreláció a dehidrogenáz, a proteáz enzimaktivitások és a szervesanyag terhelés között jelentősebb, mint a lipáz enzimaktivitások és a szervesanyag terhelés között. A mezofil hőmérsékletű fermentorban mért enzimaktivitások és a fajlagos szervesanyag terhelés közötti kapcsolat sokkal kisebb mértékű, mint a termofil hőmérsékletű reaktorban mért enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag közötti kapcsolat (15-16. táblázatok).

A félüzemi kísérletben, termofil körülmények között pozitív szignifikáns korrelációt a szervesanyag terhelés és a dehidrogenáz ($R = 0,602$, $p < 0,01$, $n = 30$), valamint a proteáz enzimaktivitás ($R = 0,476$, $p < 0,01$, $n = 30$) között mutattam ki. A fajlagos gázmennyiség és dehidrogenáz ($R = 0,397$, $p < 0,05$, $n = 30$), valamint a proteáz enzimaktivitás ($R = 0,445$, $p < 0,01$, $n = 30$) között szintén korrelációt találtam (15. táblázat).

Mezofil körülmények között a szervesanyag terhelés és a dehidrogenáz ($R = 0,360$, $p \leq 0,05$, $n = 30$) és a proteáz enzimaktivitás ($R = 0,423$, $p \leq 0,01$, $n = 30$) között korreláció van. A fajlagos gázmennyiség esetén csak a dehidrogenáz enzimaktivitás között ($R = 0,392$, $p < 0,05$, $n = 30$) volt kimutatható, a 0,01 szignifikancia szintet meghaladó kapcsolat (16. táblázat). Mindkét hőmérsékleten az összes többi ellenőrző paraméter és a fajlagos szervesanyag terhelés, valamint fajlagos gázmennyiség között korrelációt nem találtam (15-16. táblázatok).

15. táblázat: A félüzemi termofil hőmérsékletű rothasztás korrelációs adatai (n=30)

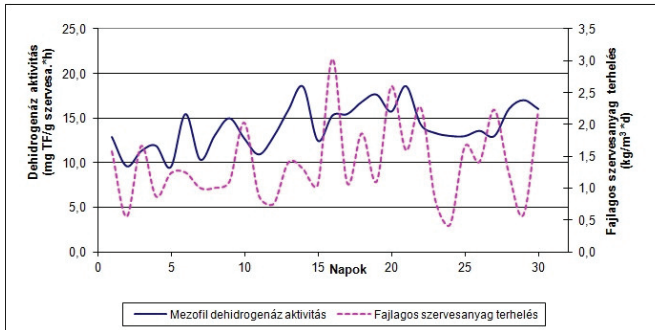
		pH	Hőmérséklet	Illósav	Lúgosság	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	0,130	-0,101	-0,128	-0,128	0,602**	0,476**	0,351
	Szignifikancia szint (p)	0,492	0,594	0,499	0,499	0,001	0,008	0,058
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	-0,340	-0,215	0,003	-0,183	0,397*	0,445**	0,208
	Szignifikancia szint (p)	0,858	0,254	0,986	0,332	0,030	0,005	0,269

Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.

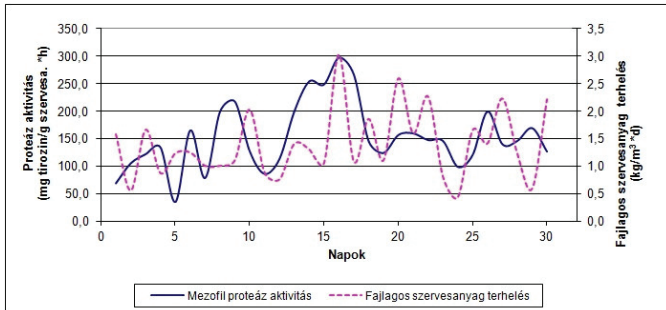
16. táblázat: A félüzemi mezofil hőmérsékletű rothasztás korrelációs adatai (n=30)

		pH	Hőmérséklet	Illósav	Lúgosság	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	-0,441	0,157	0,220	-0,128	0,360*	0,423**	0,261
	Szignifikancia szint (p)	0,015	0,409	0,244	0,500	0,050	0,010	0,163
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	-0,194	-0,055	0,231	-0,185	0,392*	0,290	0,220
	Szignifikancia szint (p)	0,303	0,771	0,220	0,328	0,032	0,086	0,243

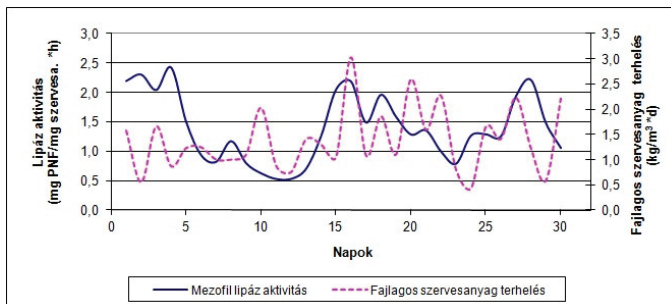
Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.



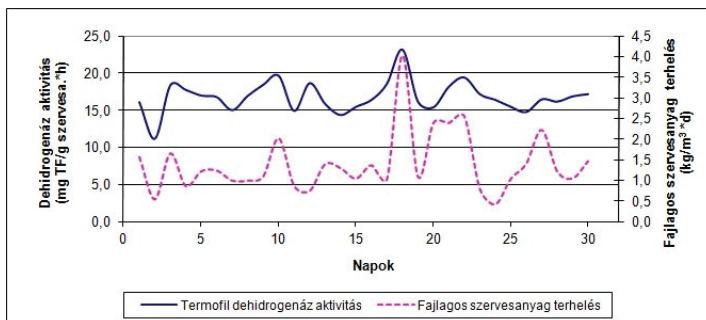
37. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban



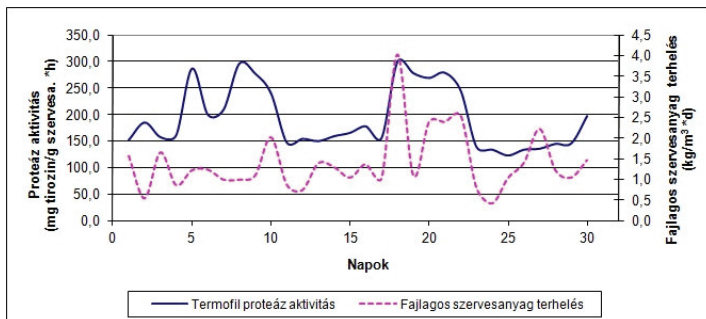
38. ábra: A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban



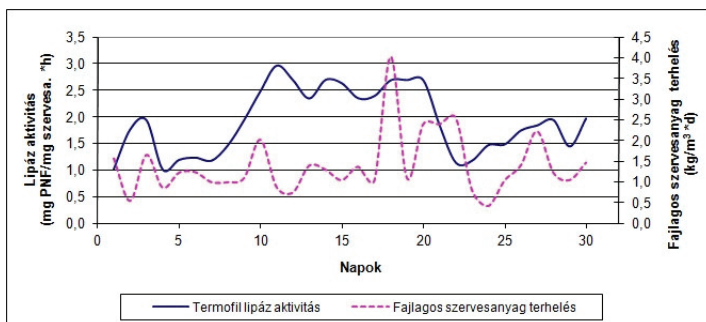
39. ábra: A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban



40. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi termofil hőmérsékletű fermentorban



41. ábra: A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi termofil hőmérsékletű fermentorban



42. ábra: A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi termofil hőmérsékletű fermentorban

4.3.1.2. Az üzemi kísérletsorozat bemutatása

A kísérleti periódus alatt a mezofil, illetve a termofil üzemi toronyokban vizsgáltam a klasszikus ellenőrző paraméterek, az enzimaktivitások és a fajlagos gázmennyiség, illetve a szervesanyag terhelés közötti kapcsolatot. Munkám során a termofil torony mellett az egyik mezofil tornyot vizsgáltam.

A 17. táblázatban foglaltam össze az 50 napos kísérleti periódus alatt a legfontosabb üzemelési paraméterek átlagértékeit és szórás adatait (n=50).

17. táblázat: A kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=50) az üzemi reaktorokban

Paraméterek	Mezofil rendszer	Termofil rendszer
Hőmérséklet (°C)	35,6±0,6	54,6±0,5
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	3,24±0,74	2,10±0,76
Hidraulikus tartózkodási idő (d)	17±1,3	6±0,5

A kísérleti periódus során vizsgáltam a hagyományos paramétereket (szárazanyag-tartalom, szervesanyag-tartalom, kémhatás, illósav, lúgosság, gázösszetétel), valamint a dehidrogenáz, a proteáz, a lipáz enzimaktivitásokat. Korrelációs vizsgálatokat végeztem a szervesanyag terhelés, a fajlagos gázmennyiség és a mért enzimaktivitások között.

4.3.1.2.1. Az üzemi kísérletsorozat eredményei

A termofil rendszerben a nagyobb szervesanyag hasznosításnak köszönhetően nagyobb fajlagos gáztermelést tapasztaltam, amely összhangban áll a korábban ismertetett szakirodalmakban (Ahrling 1994, Aitken et al. 1992, Garber 1982, Iranpour et al., Zábránská et al. 2000a) leírtakkal. Vizsgálataim során a mezofil hőmérsékletű átlagos fajlagos gázmennyiség 965±104 Nm³/1000kg szervesanyag, míg a termofil hőmérsékletű átlag 990±108 Nm³/1000kg szervesanyag volt, amely 2,5% növekedést jelentett. Az átlagos fajlagos metánmennyiség a mezofil hőmérsékletű fermentor esetén 523±55,3 Nm³/1000kg szervesanyag, míg a termofil hőmérsékleten 587±64,0 Nm³/1000kg szervesanyag volt. A biogáz metántartalma 9,4%-kal nagyobbak adódott (a mezofil átlag 54,2±3,9%, míg a termofil átlag 59,3±2,3%).

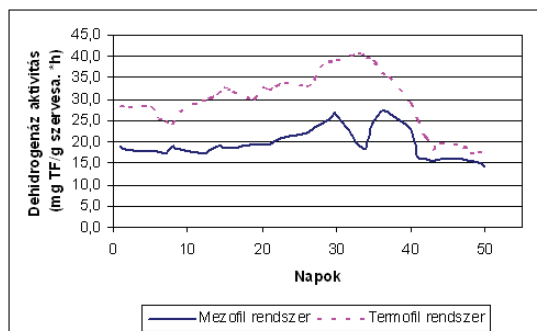
Mind a mezofil, mind pedig a termofil rendszerben a kémhatás csak kis mértékben változott, értékük az elfogadható intervallumban mozgott. A termofil rendszerben az átlagos pH érték az optimális intervallum minimum értéke körüli volt (pH 7,2±0,5). Megállapítható, hogy a kémhatás önmagában nem megfelelő paraméter a

folyamatok nyomon követésére. A kémhatással összhangban változott az illósav mennyisége, amelynek értéke termofil hőmérsékletű fermentáció esetén nagyobb ($3710 \pm 793 \text{ mgCH}_3\text{COOH/dm}^3$), de nagyobb mértékű az illósav bakteriális hasznosítása is, amelyet alátámasztott a nagyobb gáztermelés és metán kihozatal is. A fentiekkel összefüggésben a rendszer pufferkapacitását jelentő lúgosság értéke a mezofil hőmérsékletű rendszerben volt nagyobb (átlagos értéke $5982 \pm 952 \text{ mgCaCO}_3/\text{dm}^3$). A mért adatokat és szórás-százalékukat (RSD%) a 18. táblázat tartalmazza.

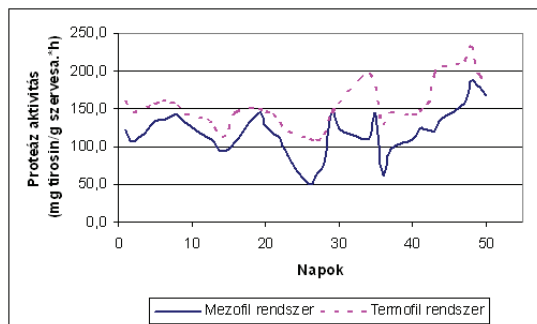
18. táblázat: Az üzemellenőrzési paraméterek és az enzimaktivitások változása mezofil és a termofil rendszerben, üzemi körülmények között az 50 napos kísérleti periódus ideje alatt (n=50)

Paraméter	Mezofil rendszer		Termofil rendszer	
	Átlag	RSD %	Átlag	RSD %
Fajlagos gázmennyiség ($\text{Nm}^3/1000\text{kg}$ szervesa.)	965	10,8	990	10,9
A biogáz metántartalma (%)	54,2	7,1	59,3	4,0
Metán mennyisége ($\text{Nm}^3/1000\text{kg}$ szervesa.)	523	11,2	587	10,1
pH	7,9	3,7	7,2	6,3
Lúgosság ($\text{mgCaCO}_3/\text{dm}^3$)	5982	16	4659	26
Illósav ($\text{mgCH}_3\text{COOH/dm}^3$)	2077	18	3710	21
Dehidrogenáz (mg TF/g szervesa.*h)	19,5	17,8	29,5	23,5
Proteáz (mg tirozin/g szervesa.*h)	119,7	25,4	154,6	19,9
Lipáz (mg PNF/g szervesa.*h)	224,6	40,5	294,2	30,3

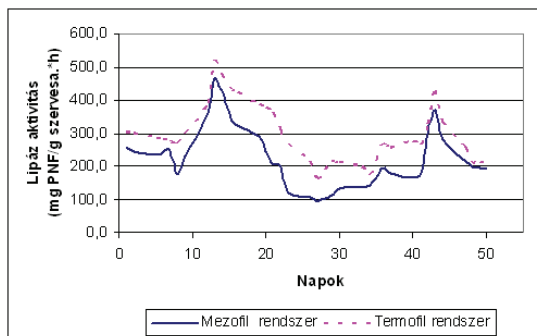
Mindhárom enzimaktivitás értéke a termofil hőmérsékletű rendszerben az intenzívebb bakteriális tevékenységnek köszönhetően meghaladta a mezofil hőmérsékletű rendszerben mért értékeket, amelyet a termofil rendszerben tapasztalt nagyobb fajlagos gáztermelés is jelzett. A kétféle hőmérsékleten üzemelő anaerob rendszerekre a sejtek összaktivitását jelző dehidrogenáz aktivitásokat a 43. ábra, a szubsztrát specifikus proteáz aktivitásokat a 44. ábra, míg a szintén szubsztrát specifikus lipáz aktivitásokat a 45. ábra mutatja be. Az enzimaktivitások kísérleti periódusra jellemző átlagos értékeit és szórás-százalékait pedig a 19. táblázat tartalmazza.



43. ábra: A dehidrogenáz aktivitás változása a mezofil, illetve a termofil üzemi méretű rendszerben



44. ábra: A proteáz aktivitás változása a mezofil, illetve a termofil üzemi méretű rendszerben

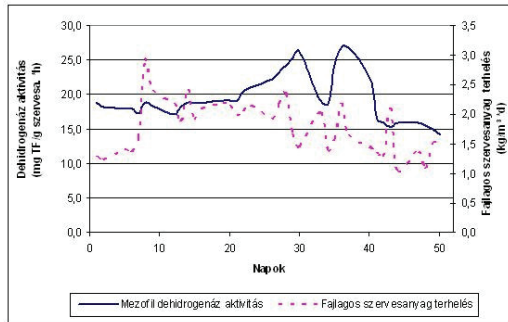


45. ábra: A lipáz aktivitás változása a mezofil, illetve a termofil üzemi méretű rendszerben

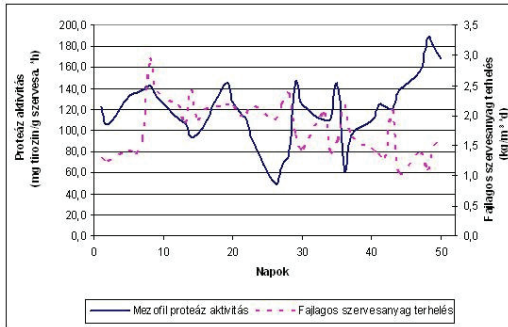
A két különböző hőmérsékletű, ipari méretű anaerob (2600 m^3 -es mezofil és 2000 m^3 -es termofil) fermentorokban végzett 50 napos vizsgálataim alapján összefoglalásképpen megállapítható, hogy a termofil rendszer azonos terhelés mellett nagyobb fajlagos gázkihozattal jellemezhető. A fűtőértéket jelentő metán mennyisége a biogázon belül átlag $54,2 \pm 3,9\%$ -ról átlag $59,3 \pm 2,3\%$ -ra nőtt, ez átlagosan $9,4\%$ növekedést jelentett. A metán átlagos napi mennyisége $523 \text{ Nm}^3/1000 \text{ kg}$ száraz szervesanyag értékről $588 \text{ Nm}^3/1000 \text{ kg}$ száraz szervesanyag értékre nőtt, ez $12,3\%$ -os növekedést (kb. $64,5 \text{ Nm}^3$ metánt) jelent. Ez a fontos tény kompenzálja a termofil rendszer nagyobb hőigényét, illetve a termosztálás egyenletességének szükségességét. A termofil rendszerekben ugyanis az $1\text{-}2 \text{ }^\circ\text{C}$ hirtelen hőmérsékletváltozás megzavarhatja az üzemelés egyensúlyát.

A klasszikus ellenőrző paraméterek közül a kémhatás nem mutatott jelentős különbséget a két vizsgált hőmérsékleten, mindkét esetben értéke az optimális intervallumban ingadozott, ezért magában nem tekinthető üzemi ellenőrző paraméternek. A lúgosság átlagos értéke a mezofil rendszerben nagyobb volt a termofil rendszerhez viszonyítva, amely azonban még a termofil hőmérsékleten továbbra is megfelelően biztosította a rendszer pufferekapacitását. A termofil rendszerekben a szakirodalom alapján nagyobb illósav koncentrációt mérhetünk és hasznosítása is nagyobb, mint a mezofil rendszereké, ezt támasztották alá eredményeim is (lásd *18. táblázat*), amelyek összhangban álltak a fajlagos gáztermelési adatokkal.

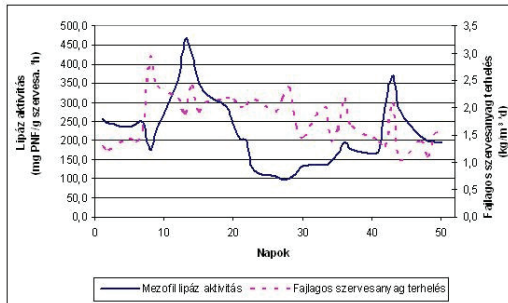
A kísérleti periódus alatti enzimaktivitások és a megfelelő fajlagos szervesanyag terhelések változását a *46.-51. ábrák* szemléltetik.



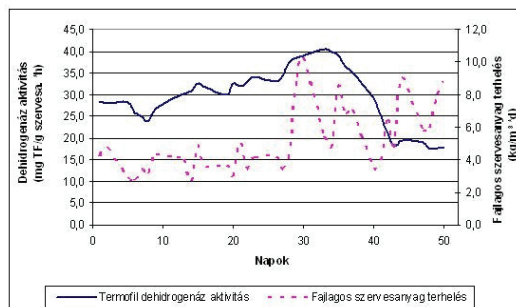
46. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban



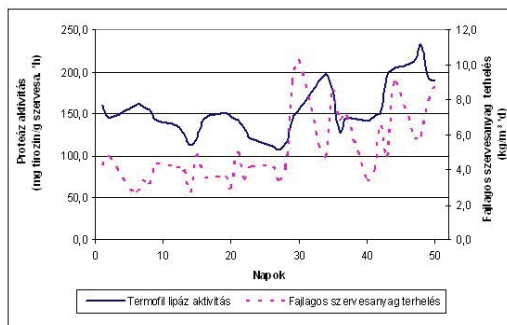
47. ábra: A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban



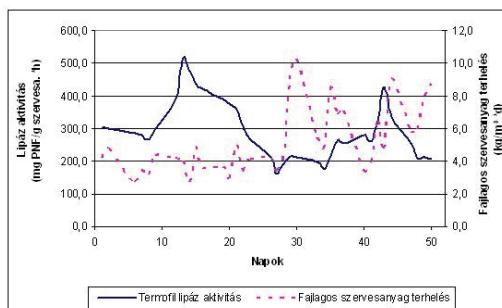
48. ábra: A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban



49. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi termofil hőmérsékletű fermentorban



50. ábra: A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi termofil hőmérsékletű fermentorban



51. ábra: A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi termofil hőmérsékletű fermentorban

Az üzemi kísérletben, mezofil körülmények között a fajlagos szervesanyag terhelés és a proteáz enzimaktivitás között pozitív szignifikáns kapcsolatot tapasztaltam ($R = 0,423$, $p < 0,05$, $n = 36$), amelyet egy, illetve két napos időeltolással megvizsgálva sem mutatható ki jelentős változás (20. táblázat). A dehidrogenáz enzimaktivitás esetén az enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés között is szignifikáns a kapcsolat van ($R = 0,355$, $p < 0,05$, $n = 36$), azaz időeltolás nélkül, azonnal jelezte a szervesanyag változását, míg a lipáz enzimaktivitás esetén a kapcsolat meghaladja a 0,05 szignifikancia szintet. A fajlagos gázmennyiség és a proteáz enzimaktivitás esetén szignifikáns kapcsolatot tudtam kimutatni ($R = 0,429$, $p < 0,05$, $n = 36$), amelyet időeltolással megvizsgálva megállapítható, hogy egy napos időeltolás esetén a korrelációs együttható nő és a szignifikancia szint csökken ($R = 0,451$, $p < 0,01$, $n = 36$), amely a két vizsgált paraméter közötti kapcsolat erősségét mutatja. A lipáz enzimaktivitás esetén is van kapcsolat, de a kapcsolat a 0,05 szignifikancia szintet kissé meghaladja ($R = 0,325$, $p = 0,053$, $n = 36$) (19. táblázat).

19. táblázat: A mezofil hőmérsékletű üzemi rothasztás korrelációs adatai ($n=36$)

		Időeltolás nélkül			1 napos időeltolással			2 napos időeltolással		
		Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	0,355*	0,423*	0,074	0,317	0,385*	0,140	0,247	0,392*	0,150
	Szignifikancia szint (p)	0,039	0,013	0,668	0,064	0,022	0,430	0,146	0,022	0,406
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	0,239	0,429*	0,325	0,103	0,451*	0,279	0,093	0,167	0,035
	Szignifikancia szint (p)	0,161	0,011	0,053	0,554	0,007	0,105	0,601	0,345	0,848

Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.

A termofil üzemi kísérletben a proteáz enzimaktivitás és a szervesanyag terhelés között negatív szignifikáns kapcsolat van ($R = -0,409$, $p < 0,05$, $n = 36$). Ez a kapcsolat a termofil hőmérséklet fehérjékre gyakorolt denaturáló hatásával magyarázható, ezen a hőmérsékleten ugyanis a mikroorganizmusok számára bizonyos idő kell a denaturált fehérjék megfelelő lebontásához. Ezt támasztja alá, hogy egy, illetve két napos időeltolással már a két vizsgált paraméter között a kapcsolat pozitív és szignifikáns ($R_{1 \text{ napos}} = 0,453$, $p < 0,01$; $R_{2 \text{ napos}} = 0,531$, $p < 0,01$, $n = 36$). Ugyanezt mutatja a lipáz enzimaktivitás és a szervesanyag terhelés közötti korrelációs vizsgálat is ($R_{1 \text{ napos}} = 0,329$, $p = 0,054$; $R_{2 \text{ napos}} = 0,409$, $p < 0,05$, $n = 36$) (20. táblázat).

A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos gázmennyiség között pozitív szignifikáns korrelációt tudtam kimutatni ($R = 0,445$, $p < 0,01$, $n = 36$), amely az egy napos időeltolás esetén erősödik ($R_{1 \text{ napos}} = 0,476$, $p < 0,01$, $n = 36$). A lipáz enzimaktivitás esetén a kapcsolat időeltolás nélkül a legszorosabb ($R = 0,383$, $p < 0,05$, $n = 36$), időeltolással vizsgálva pedig romlik (20. táblázat)

20. táblázat: A termofil hőmérsékletű üzemi rothasztás korrelációs adatai ($n=36$)

		Időeltolás nélkül			1 napos időeltolással			2 napos időeltolással		
		Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	0,021	-0,409	-0,365	0,026	0,453**	0,329	0,037	0,531**	0,409**
	Szignifikancia szint (p)	0,903	0,011	0,029	0,882	0,006	0,054	0,834	0,001	0,016
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	0,205	0,445**	0,383*	0,227	0,476**	0,140	0,267	0,304	0,181
	Szignifikancia szint (p)	0,231	0,007	0,028	0,190	0,005	0,436	0,127	0,071	0,291

Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.

4.3.2. A félüzemi és üzemi kísérletsorozat összehasonlítása és értékelése

A bemutatott félüzemi és üzemi szintű rothasztás üzemében alapvetően két különbség van, ezek közül az egyik, hogy a félüzemi fermentorok intenzívebb kevertetéssel rendelkeznek, így a lebontás hatékonyabb, ezt támasztja alá a nagyobb metántartalom a félüzemi körülmények között mind mezofil, mind pedig termofil hőmérsékleten egyaránt. A félüzemi reaktorban mezofil hőmérsékleten a metántartalom a vizsgálataim során a biogáz $57,5 \pm 6,1\%$ -a, termofil hőmérsékleten $62,8 \pm 8,8\%$ -a, az üzemi fermentorban pedig mezofil hőmérsékleten a metántartalom a biogáz $54,2 \pm 3,9\%$ -a, termofil hőmérsékleten pedig $59,3 \pm 2,4\%$ -a volt. Mindkét kísérletsorozat esetén a szakirodalomnak megfelelően a termofil hőmérsékletű fermentáláskor több biogáz termelődött, mint a mezofil hőmérsékletű rothasztás esetén, valamint a biogáz metántartalma is nagyobb volt termofil hőmérsékleten.

Másik különbség, hogy a rothasztásra kerülő iszap szubsztrát összetétele változó. A kísérleti reaktorokba csak a szennyvíztelepi kevert iszapot (nyers- és fölösizap) adagoltuk, míg üzemi körülmények között ezen kívül a szennyvíztelepre beszállított egyéb iszapok, illetve szerves hulladékok is rothasztásra kerültek. Az eltérő iszapösszetétellel (szubsztrát összetétellel) magyarázható a lipáz enzimaktivitások közötti nagyságrendi különbség. A félüzemi fermentorokban mért $1,4 \pm 0,6$ mg PNF/g

szervesa. *h (mezofil hőmérsékletű) átlagérték és a $1,9 \pm 0,6$ mg PNF/g szervesa. *h (termofil hőmérsékletű) átlagérték rendre kisebbek, mint az üzemi reaktorokban mért $225 \pm 91,0$ mg PNF/g szervesa. *h (mezofil hőmérsékletű) átlagérték, illetve a $294 \pm 89,1$ mg PNF/g szervesa. *h (termofil hőmérsékletű) átlagértékek. Ezen adatokból arra következtethetünk, hogy az üzemi szintű fermentorokba adagolt szubsztrát nagy zsírtartalmú volt. A dehidrogenáz és a proteáz enzimaktivitások esetén nagyságrendi eltérést nem találtam az eltérő üzemeltetési körülmények ellenére sem.

Az enzimaktivitás vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a termofil rendszer nagyobb enzimaktivitással jellemezhető, mint a mezofil rendszer. Mind a három vizsgált enzimaktivitás esetén (a sejtek összaktivitását jellemző dehidrogenáz és a két szubsztrát specifikus enzimaktivitás: proteáz, lipáz) nagyobb értékeket mértem a termofil rendszerben. Az enzimaktivitás vizsgálatokat tapasztalataim szerint célszerű bevonni az ellenőrző paraméterek csoportjába, hiszen a fermentáció első, sebesség-meghatározó lépcsőjét érzékenyen jellemzik.

4.3.3. A hőmérséklet-változtatás hatásának vizsgálata félüzemi reaktorokban

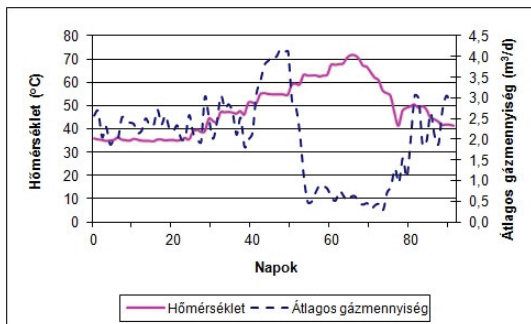
Ebben a kísérleti periódusban a két kísérleti reaktort párhuzamosan üzemeltettük. A reaktorok hőmérsékletét mezofil hőmérsékletről termofil hőmérsékletre, illetve a termofil üzemeltetési hőmérséklet felső tartományába állítottuk át közel azonos fajlagos szervesanyag terhelés mellett. Az üzemmód átállítását $3\text{ }^{\circ}\text{C/d}$ hőmérséklet-emeléssel valósítottuk meg. Minden egyes hőmérsékletemelést között három nap adaptációs időt tartottunk. Az átüzemelés során Iranpour et al. (2002) által javasolt 3°C hőmérsékletemelést és a hőmérsékletemelések közötti 3 napos adaptálódási időt figyelembe vettük. A kísérleti periódus közel három hónapig tartott. A kísérleti periódus első 25 napja mezofil hőmérsékletű szakasz volt, a hőmérsékletemelést a 26. napon kezdődött és a folyamatos hőmérsékletemelést ütemének megfelelően 92 napig tartott. A termofil hőmérsékletű szakasz 11 napnak tekinthető, ezután a hőmérséklet meghaladta a termofil hőmérsékletnek számító optimumot. A kísérleti periódus alatt a szokásos ellenőrző paramétereket és a dehidrogenáz, a proteáz, a lipáz enzimaktivitást vizsgáltam. A 21. táblázatban a kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek átlagértékeit és szórás adatait tüntettem fel mindkét reaktorra vonatkozóan.

21. táblázat: A kísérleti periódus jelzett szakaszában az üzemeltetési paraméterek átlagértékei és szórásadatai a félüzemi reaktorokban

Paraméterek		I. reaktor	II. reaktor
Hőmérséklet (°C)	Mezofil átlag (n=25)	35,0±0,6	35,0±0,4
	Termofil átlag (n=11)	54,0±1,8	52,8±1,7
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d) (n=92)		2,89±1,11	2,86±0,93
Hidraulikus tartózkodási idő (d) (n=92)		13±0,4	13±0,3

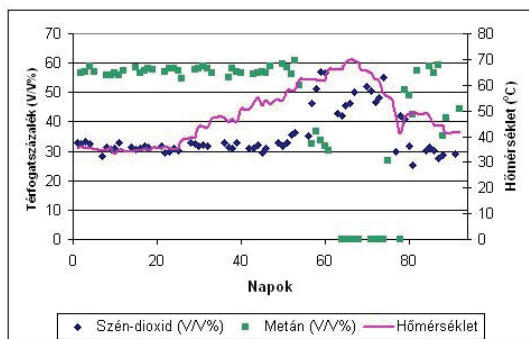
4.3.3.1. A hőmérséklet átüzemelési kísérletsorozat eredményei

A hőmérséklet átüzemelési kísérletsorozatban mindkét félüzemi fermentorban a hőmérsékletemelés hatására változott a gáztermelés. Az 52. ábra az átlagos gáztermelést mutatja be a hőmérsékletemelés hatására. A reaktorok folyamatos rátáplálással, közel azonos fajlagos szervesanyag terheléssel üzemeltek (ld. 20. táblázat). Az átlagos mezofil gáztermelés 2,13±0,68 Nm³/d értékről 3,89±0,81 Nm³/d átlagos termofil gáztermelés értékre változott. 60°C felett a gáztermelés jelentősen lecsökkent, értéke nem érte el az átlagos 0,5 Nm³/d értéket.

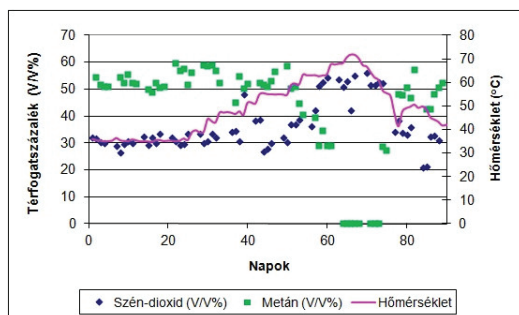


52. ábra: Az átlagos gáztermelés változása a félüzemi reaktorokban a hőmérsékletemelés hatására (a két reaktorban mért értékek átlaga)

Mindkét kísérleti reaktorban a hőmérsékletemelés hatására a biogáz összetétele is megváltozott. Az 53. és az 54. ábrán az I. és II. számú kísérleti reaktor működtetésekor nyert adatokat közlöm. A metán mennyisége mezofil hőmérsékleten 55 V/V%, míg termofil hőmérsékleten 60 V/V% körül alakult, de 60°C fölött jelentősen lecsökkent, 70°C felett pedig 2-3 V/V% körül ingadozott.

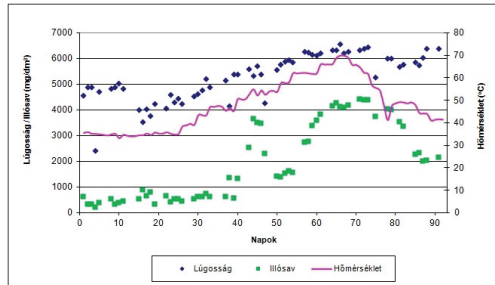


53. ábra: A gázösszetétel változása az I. számú félüzemi reaktorban

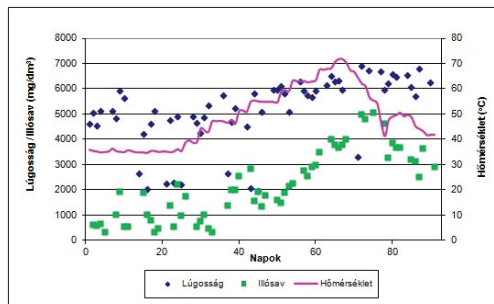


54. ábra: A gázösszetétel változása az II. számú félüzemi reaktorban

Az anaerob lebontást nyomon követő, általánosan használt ellenőrző paraméterek változását az 55. és 56. ábrák mutatják be. A gyakorlatban alkalmazott ellenőrző paraméterek közül az illósav mérése jól mutatta a változásokat. Az illósav koncentrációja növekedett (I. reaktor: 44. napig, 54,9°C-ig; II. reaktor: 43. napig, 54,9°C-ig), majd termofil hőmérsékleten csökkent (I. reaktor: 51. napig, 57,8°C-ig; II. reaktor: 51. napig, 59,0°C-ig), majd ismét emelkedett a hőmérséklet emelkedés hatására (I. reaktor: 71. napig, 64,5°C-ig; II. reaktor: 75. napig, 55,5°C-ig). A termofil hőmérsékleten az illósav hasznosítása nagyobb (csökken a koncentrációja), mint mezofil hőmérsékleten, ezért a termofil rendszerek jobban elviselik a terhelésnövekedést. A lúgosság kismértékű növelésével továbbra is biztosítható a rendszer puffertkapacitása.

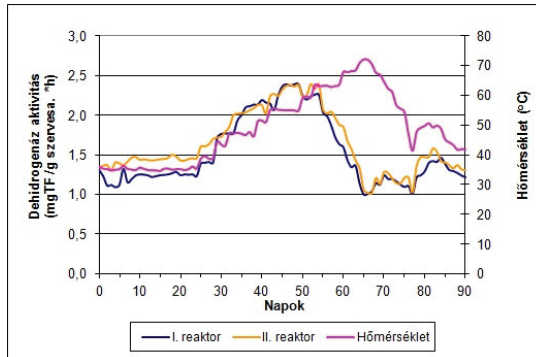


55. ábra: A lúgosság és az illósav változása az I. számú félüzemi reaktorban



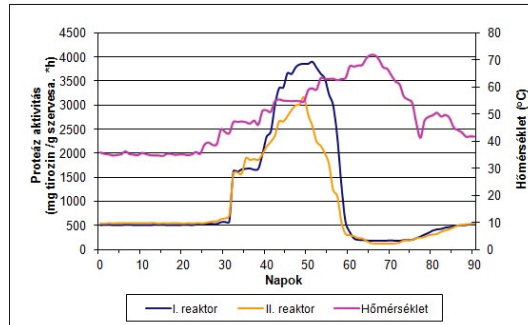
56. ábra: A lúgosság és az illósav változása a II. számú félüzemi reaktorban

A dehidrogenáz enzimaktivitás, mint az összaktivitást jellemző paraméter kitűnően jelezte a megváltozott környezeti tényező hatását. Termofil hőmérséklet eléréseig nőtt az értéke, míg a túlságosan magas hőmérsékleten ($> 60^{\circ}\text{C}$) csökkent, hiszen a baktériumok életfeltételei kedvezőtlenül alakultak. A dehidrogenáz enzimaktivitás változását az 57. ábra szemlélteti.

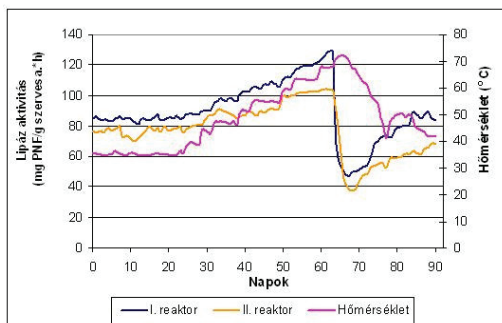


57. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás változása a félüzemi reaktorokban

A dehidrogenáz enzimaktivitás változásához hasonló képet mutat a proteáz enzimaktivitás változása is (58. ábra). A hőmérséklet emelkedés hatására értéke megnőtt, majd a mikroorganizmusok számára kedvezőtlen hőmérséklet elérése után ($>60^{\circ}\text{C}$) jelentősen csökkent.



58. ábra: A proteáz enzimaktivitások változásai a félüzemi reaktorokban



59. ábra: A lipáz enzimaktivitások változásai a félüzemi reaktorokban

A lipáz enzimaktivitás mindkét reaktorban a hőmérséklet emelkedéssel összhangban nőtt (59. ábra), majd drasztikusan lecsökkent a baktériumoknak kedvezőtlen hőmérséklet elérésekor. A hőmérséklet optimális értékének visszaállításakor az enzimaktivitás értéke ismét növekedett. A három vizsgált enzimaktivitás esetén a lipáz enzimaktivitás változása a legkisebb mértékű (az RSD% értékei is a legkisebbek).

Az I. számú reaktorban a fajlagos gázmennyiség pozitív szignifikáns korrelációban áll a dehidrogenáz enzimaktivitással ($R = 0,408$, $p < 0,01$, $n = 91$), a proteáz enzimaktivitással ($R = 0,404$, $p < 0,01$, $n = 91$) és a lipáz enzimaktivitással ($R = 0,282$, $p < 0,01$, $n = 91$). A szervesanyag terhelés és az említett három enzimaktivitás között nem tudtam szignifikáns kapcsolatot kimutatni (22. táblázat).

A II. reaktorban, hasonlóan az I.-es reaktorhoz, pozitív szignifikáns kapcsolatot találtam a fajlagos gázmennyiség és az enzimaktivitások között ($R_{\text{dehidrogenáz}} = 0,370$, $p < 0,01$; $R_{\text{proteáz}} = 0,485$, $p < 0,01$; $R_{\text{lipáz}} = 0,203$, $p < 0,05$; $n = 91$). A szervesanyag terhelés nem mutatott korrelációt az enzimaktivitásokkal ebből a reaktorból származó minták esetén sem (23. táblázat). Ez azzal magyarázható, hogy a kísérlet sorozat esetén az anaerob lebontás folyamatában a hőmérséklet meghatározóbb környezeti tényező, mint a szervesanyag terhelés, ezt támasztják alá a hőmérséklet és az enzimaktivitások közötti korrelációk.

A hőmérséklet és a dehidrogenáz enzimaktivitás között szignifikáns kapcsolatot mutattam ki ($R_{\text{I. reaktor}} = 0,317$, $p < 0,01$; $R_{\text{II. reaktor}} = 0,393$, $p < 0,01$, $n = 91$). Mindkét reaktor esetén a hőmérséklet és a proteáz enzimaktivitás között is szignifikáns kapcsolat van ($R_{\text{I. reaktor}} = 0,290$, $p < 0,01$; $R_{\text{II. reaktor}} = 0,228$, $p < 0,05$, $n = 91$), míg lipáz

enzimaktivitás esetén 0,05 szignifikancia szintet nem éri el a kapcsolat (22-23. táblázatok).

22. táblázat: Az I. reaktor korrelációs adatai (n=91)

I.reaktor		pH	Hőmérséklet	Illósav	Lúgosság	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	0,067	-0,003	-0,073	-0,092	0,001	-0,048	0,067
	Szignifikancia szint (p)	0,536	0,976	0,579	0,483	0,991	0,652	0,528
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	-0,270	-0,428	-0,368	-0,256	0,408**	0,404**	0,282**
	Szignifikancia szint (p)	0,011	0,000	0,004	0,046	0,000	0,000	0,007
Hőmérséklet	Korrelációs együttható (R)	0,817**	1,000	0,372**	0,248	0,317**	0,290**	0,155
	Szignifikancia szint (p)	0,000		0,030	0,054	0,002	0,005	0,143

Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.

23. táblázat: A II. reaktor korrelációs adatai (n=91)

II.reaktor		pH	Hőmérséklet	Illósav	Lúgosság	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	-0,005	-0,069	-0,114	-0,019	0,038	0,002	0,126
	Szignifikancia szint (p)	0,961	0,519	0,385	0,884	0,722	0,986	0,226
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	0,060	-0,438	-0,500	-0,330	0,370**	0,485**	0,203*
	Szignifikancia szint (p)	0,578	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,043
Hőmérséklet	Korrelációs együttható (R)	0,109	1,000	0,647**	0,162	0,393**	0,228*	0,097
	Szignifikancia szint (p)	0,310		0,000	0,126	0,002	0,030	0,361

Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.

A három vizsgált enzimaktivitást összevetve megállapítható, hogy a dehidrogenáz aktivitás szorosabb kapcsolatot jelzett a hőmérsékletváltozással (ahogy a korrelációs együttható jelzi), valamint megbízhatóbban nyomon követte a hőmérsékletváltozás kedvező, illetve kedvezőtlen hatását, mint a szubsztrát specifikus proteáz és lipáz enzimaktivitások. A klasszikus ellenőrző paraméterek közül pedig az

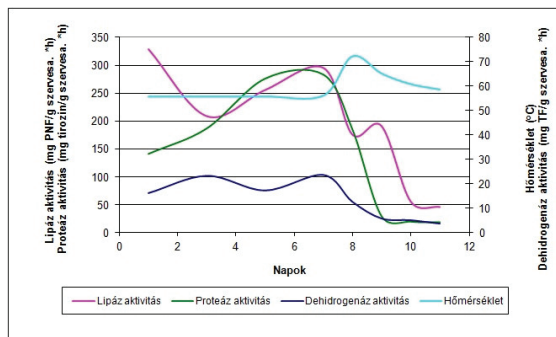
illósav változása jelezte a reaktorokban bekövetkezett változásokat. Mindkét reaktor esetén a hőmérséklet és az illósav között szignifikáns kapcsolat mutatható ki ($R_{I. \text{ reaktor}} = 0,372$, $p < 0,05$; $R_{II. \text{ reaktor}} = 0,647$, $p < 0,01$, $n = 91$).

4.3.4. Üzemeltetési probléma okozta drasztikus hőmérséklet-változás hatásának jelzése enzimaktivitás vizsgálatokkal

Az egyik félüzemi fermentorban a hőmérséklet-szabályozó meghibásodása következtében a hőmérséklet jelentősen megnőtt. Ezt a meghibásodást az üzemeltetés jelentős késéssel tudta csak korrigálni, a reaktorban a hőmérséklet 12 órán át meghaladta a 70°C-ot. A $2,00 \pm 0,36 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ fajlagos szervesanyag terheléssel folyamatosan működő reaktor (a meghibásodás alatt is) iszapállapotának jellemzésére az üzemellenőrzési paraméterek mellett ezúttal is a dehidrogenáz, a proteáz, a lipáz enzimaktivitás vizsgálatokat végeztem el. A kísérleti periódus 11 nap volt, ebből hét nap a hősokk előtti, míg négy nap a hősokk utáni periódusnak tekinthető, a 11. napon a reaktort leürítették.

4.3.4.1. Üzemeltetési probléma okozta drasztikus hőmérséklet-változás hatásának jelzése enzimaktivitás vizsgálatokkal - eredmények

A félüzemi fermentorban a hőmérséklet-szabályozó meghibásodására bekövetkező drasztikus hőmérséklet emelkedést az üzemellenőrzési paraméterek és a vizsgált dehidrogenáz enzimaktivitás is jelezte. A kísérleti periódus alatt mért paraméterek összesítőjét a 24. táblázat tartalmazza. A 60. ábrán a vizsgált három enzimaktivitás és hőmérséklet változása látható. Az ábráról leolvasható, hogy a drasztikus hőmérséklet emelkedés hatására jelentősen csökkent mindhárom enzimaktivitás értéke, ezzel összhangban áll a fajlagos gázmennyiség csökkenése. A fajlagos gázmennyiség a $660 \text{ Nm}^3/1000\text{kg}$ szervesanyag értékről a „hősokk” hatására $250 \text{ Nm}^3/1000\text{kg}$ szervesanyag értékre, míg másnapra már $160 \text{ Nm}^3/1000\text{kg}$ szervesanyag értékre csökkent. Ha a „hősokk” előtti értéket 100%-nak tekintjük, akkor ezek a fajlagos gázmennyiség értékek 37,9%-ának, illetve 24,2%-ának felelnek meg.



60. ábra: A vizsgált enzimaktivitások változása a kísérleti periódus alatt

24. táblázat: Az üzemellenőrzési paraméterek és az enzimaktivitások változása a termofil félüzemi körülmények között a 11 napos kísérleti periódus ideje alatt

Paraméter	Hősoikk előtti periódus (n=7)		Hősoikk utáni periódus (n=4)	
	Átlag	RSD%	Átlag	RSD%
Fajlagos gázmennyiség (Nm ³ /1000kg szervesa.)	580	18,1	188	24,3
A biogáz metántartalma (%)	55,4	14,2	49,8	19,6
Metán mennyisége (Nm ³ /1000kg szervesa.)	321	15,6	93,6	17,8
Kémhatás	7,6	0,7	7,3	0,9
Lúgosság (mgCaCO ₃ /dm ³)	5028	4	4857	4
Illósav (mgCH ₃ COOH/dm ³)	1479	4	2025	28
Dehidrogenáz (mg TF/g szervesa.*h)	20,1	19,5	6,8	59,1
Proteáz (mg tirozin/g szervesa. *h)	222	31,3	63,3	88,5
Lipáz (mg PNF/g szervesa.*h)	272	19,2	117	66,2

Magyarázat: Nm³ = normál m³ (normál állapotban), TF = trifenil-formázán, PNF = para-nitro-fenol

A teljes kísérleti időt figyelembe véve a fajlagos gázmennyiség és a vizsgált három enzimaktivitás között pozitív korrelációt találtam ($R_{\text{dehidrogenáz}} = 0,955$, $p < 0,01$; $R_{\text{proteáz}} = 0,763$, $p < 0,05$; $R_{\text{lipáz}} = 0,771$, $p < 0,01$; $n = 11$). A teljes kísérleti periódus alatt a klasszikus ellenőrző paraméterek közül csak az illósav és a hőmérséklet között van szignifikáns kapcsolat ($R = 0,862$, $p < 0,01$; $n = 11$) (25. táblázat).

Ebben a kísérletben, ha csak a hősoikk utáni periódust figyelem (kísérleti periódus 8. napjától), akkor elmondható, hogy az SPSS programcsaláddal lefutott korreláció analízis a hőmérséklet és a dehidrogenáz enzimaktivitás között mutatott

pozitív szignifikáns kapcsolatot ($R = 0,962$, $p < 0,05$, $n=4$), tehát a dehidrogenáz enzimaktivitás a leginkább alkalmazható a hőmérséklet okozta üzemzavar kimutatására.

25. táblázat: A kísérleti periódus korrelációs adatai ($n=11$)

		pH	Hőmérséklet	Illósav	Lúgosság	Dehidrogenáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	0,013	-0,148	0,256	0,232	0,316	0,194	-0,118
	Szignifikancia szint (p)	0,976	0,726	0,540	0,580	0,446	0,645	0,782
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	0,887**	-0,644	-0,460	0,269	0,955**	0,763**	0,771*
	Szignifikancia szint (p)	0,003	0,085	0,525	0,519	0,000	0,028	0,025
Hőmérséklet	Korrelációs együttható (R)	-0,710	1,000	0,862**	-0,301	-0,459	-0,282	-0,338
	Szignifikancia szint (p)	0,049		0,006	0,469	0,252	0,499	0,412

Megjegyzés: ** jelentése: $p < 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p < 0,05$ szignifikancia szint.

4.3.5. A szervesanyag terhelés és az enzimaktivitás kapcsolata

4.3.5.1. A félüzemi kísérletsorozat bemutatása

A félüzemi és az üzemi kísérletsorozat tapasztalatai alapján ebben a kísérleti periódusban a szervesanyag terhelés és az enzimaktivitások közötti kapcsolatot vizsgáltam. A kísérleti reaktorban a szervesanyag terhelés változását szennyvíziszap mellett folyékony fehérje hulladék adagolásával értem el. A tejipari hulladék adagolás miatt az iszap szárazanyag-, szervesanyag-tartalmán, kémhatásán, illósav-tartalmán, lúgosság-tartalmán túl a szubsztrát specifikus enzimaktivitások, a proteáz és a lipáz enzimaktivitások vizsgálatára került sor. A proteáz enzimaktivitás mérését a szennyvíziszapban lévő fehérjék, míg a lipáz enzimaktivitás mérését a szennyvíziszapban jelenlévő zsírok mennyiségének változása indokolta. A kísérleti periódus 49 napig tartott a III. számú, mezofil hőmérsékletű kísérleti reaktorban. Az üzemeltetési paramétereket a 26. táblázat tartalmazza.

26. táblázat: A félüzemi kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=49) a mezofil hőmérsékletű fermentorban

Paraméterek	Mezofil rendszer
Hőmérséklet (°C)	35,4±0,3
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	6,50±0,99
Hidraulikus tartózkodási idő (d)	9±0,3

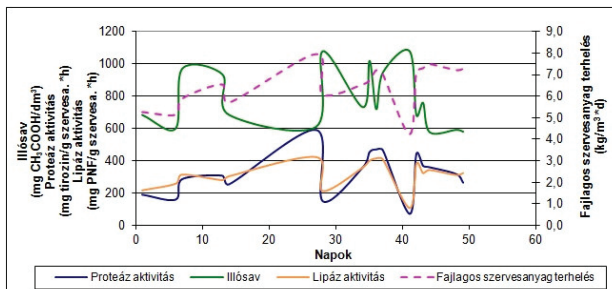
4.3.5.1.1. A félüzemi kísérletsorozat eredményei

Az eredmények összefoglalását a 27. táblázat tartalmazza, amelyből kitűnik, hogy a szervesanyag terhelés növekedésével egyidejűleg a kémhatás és a lúgosság nem változik. Az illósav kisebb eltérésekkel követi a fajlagos szervesanyag terhelés változásait. Ugyancsak megállapítható, hogy a proteáz és a lipáz enzimek aktivitása is jól követi a terhelés változását, ezt a 61. ábra is szemlélteti.

27. táblázat: Az ellenőrző paraméterek és a proteáz és a lipáz aktivitása a félüzemi, mezofil rothasztó berendezésben

Paraméter	Átlag	Szórás	RSD%
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	6,5	1,0	15,2
Szárazanyag (g/kg)	29,1	3,4	11,7
Szervesanyag (g/kg)	17,1	3,0	17,6
pH	7,3	0,2	3,0
Lúgosság (mgCaCO ₃ /dm ³)	5131	373	7
Illósav (mg CH ₃ COOH/dm ³)	778	184	24
Proteáz aktivitás (mg tirozin/g szervesa.* h)	325	136	41,9
Lipáz aktivitás (mg PNF/g szervesa.* h)	315	83,7	26,6

Magyarázat: PNF = para-nitro-fenol



61. ábra: A proteáz aktivitás, a lipáz aktivitás, az illósav-koncentráció és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a félüzemi, mezofil rothasztó berendezésben

A félüzemi kísérletben a tejipari hulladékkal történő szervesanyag terhelés változtatása alatt a szervesanyag terhelés és a vizsgált két enzimaktivitás között pozitív szignifikáns korreláció tapasztalható ($R_{\text{proteáz}} = 0,833$, $p < 0,01$; $R_{\text{lipáz}} = 0,823$, $p < 0,01$; $n = 17$), ami mindkét enzim esetén még egy napos időeltolással vizsgálva is szignifikáns marad (28. táblázat). A fajlagos gázmennyiség időeltolás nélkül vizsgálva nincs korrelációban a két említett enzimaktivitással, de egy napos időeltolással esetén ($R_{\text{proteáz}} = 0,369$, $p < 0,05$; $R_{\text{lipáz}} = 0,412$, $p < 0,05$; $n = 17$) szignifikáns kapcsolatot mutatott az a vizsgált enzimaktivitásokkal. Az illósav és a szervesanyag terhelés, illetve az illósav és a fajlagos gázmennyiség között nem mutatható ki kapcsolat (28. táblázat).

28. táblázat: A kísérleti periódus korrelációs adatai ($n=17$)

		Időeltolás nélkül			1 napos időeltolással			2 napos időeltolással		
		Illósav	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Illósav	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Illósav	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	-0,409	0,833**	0,823**	-0,352	0,754*	0,778*	-0,425	0,355	0,269
	Szignifikancia szint (p)	0,103	0,000	0,000	0,125	0,018	0,014	0,115	0,105	0,125
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	-0,114	0,293	0,159	-0,169	0,369*	0,412*	-0,152	0,377*	0,435*
	Szignifikancia szint (p)	0,662	0,254	0,541	0,704	0,035	0,031	0,622	0,037	0,042

Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.

4.3.5.2. Az üzemi kísérletsorozat bemutatása

A félüzemi kísérlet sorozatot követően üzemi körülmények között is vizsgáltam a szervesanyag terhelés és a szubsztrát specifikus enzimaktivitások kapcsolatát. Üzemi körülmények között mind a mezofil, mind pedig a termofil hőmérsékletű rothasztó iszapjának enzimaktivitás vizsgálatait elvégeztem. Az üzemi kísérletsorozat esetén nem volt lehetőség a fajlagos szervesanyag terhelés általam történő változtatására. Normál üzemmenet mellett a mezofil hőmérsékletű rothasztó esetén csak a telepre érkező szennyvízből képződött kevert szennyvíziszap szervesanyag tartalma szolgáltatta a terhelés változását. Normál üzemmenet mellett a termofil hőmérsékletű fermentor esetén a kevert szennyvíziszap és a telepre beérkező szerves hulladékok szolgálták a terhelés változását. A vizsgált kísérleti periódusban az iszap mellett tejipari és éttermi hulladék került rothasztásra, ezért ebben az esetben is az iszap szárazanyag-, szervesanyag-tartalmán, kémhatásán, illósav-tartalmán, lúgosság-tartalmán túl a szubsztrát specifikus enzimaktivitások, a proteáz és a lipáz enzimaktivitások

vizsgálatára került sor. A kísérleti periódus 28 napig tartott. A kísérleti periódus alatti üzemeltetési körülményeket a 29. táblázat tartalmazza.

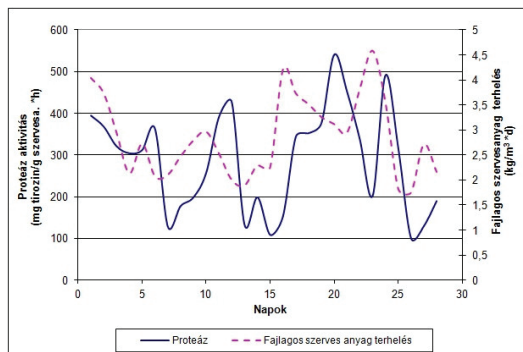
29. táblázat: A kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=28) a szervesanyag terhelés változtatása mellett üzemi körülmények között

Paraméterek	Mezofil rendszer	Termofil rendszer
Hőmérséklet (°C)	35,6±0,2	55,7±0,3
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	2,90±0,88	2,17±0,72
Hidraulikus tartózkodási idő (d)	17±6,6	14±5,7

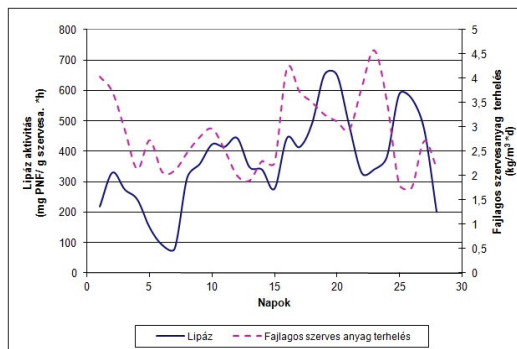
4.3.5.2.1. Az üzemi körülmények között végzett kísérletsorozat eredményei

A kísérleti periódus eredményei közül az ipari mezofil és termofil torony proteáz és lipáz eredményeit mutatom be (62.-65. ábra).

Ipari méretekben mind mezofil, mind pedig termofil hőmérsékleten is mindkét vizsgált enzimaktivitás követte a megváltozott szubsztrát terhelést.



62. ábra: A proteáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari mezofil rothasztó toronyban



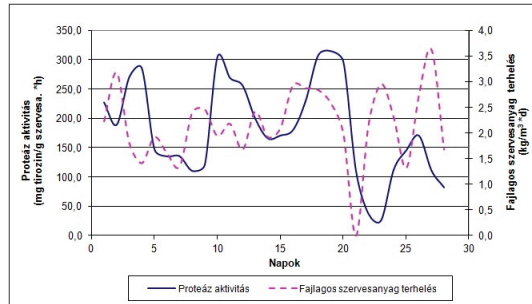
63. ábra: A lipáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari mezofil rothasztó toronyban

Üzemi, mezofil körülmények között a proteáz enzimaktivitás a fajlagos szervesanyag terheléssel 1, illetve 2 napos eltéréssel mutatott korrelációt ($R_{1 \text{ napos}} = 0,671$, $p < 0,01$; $R_{2 \text{ napos}} = 0,526$, $p < 0,01$, $n = 28$). Az 1 napos eltéréssel számolt R érték ($R_{1 \text{ napos}}$) nagyobb, mint a $R_{2 \text{ napos}}$, azaz erősebb kapcsolat van a két vizsgálati tényező között. A lipáz enzimaktivitás csak 2-3 napos eltéréssel jelezte a megváltozott szervesanyag terhelést ($R_{2 \text{ napos}} = 0,426$, $p < 0,05$; $R_{3 \text{ napos}} = 0,402$, $p < 0,05$, $n = 28$). A 2 napos eltéréssel történő korrelációanalízis szorosabb kapcsolatot jelez a fajlagos szervesanyag terhelés és a vizsgált enzimaktivitás között. A fajlagos gázmennyiség és vizsgált enzimaktivitások között egy napos időeltolással szignifikáns kapcsolat van ($R_{\text{proteáz}} = 0,498$, $p < 0,05$; $R_{\text{lipáz}} = 0,369$, $p < 0,05$, $n = 28$) (30.táblázat).

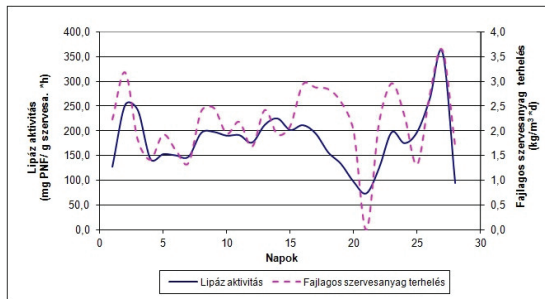
30. táblázat: A mezofil kísérleti periódus korrelációs adatai ($n=28$)

		Időeltolás nélkül		1 napos időeltolással		2 napos időeltolással		3 napos időeltolással	
		Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	0,295	0,112	0,671*	0,222	0,526*	0,426*	0,258	0,402*
	Szignifikancia szint (p)	0,127	0,569	0,000	0,266	0,006	0,030	0,213	0,046
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	0,240	0,321	0,498*	0,369*	0,090	0,159	0,117	0,019
	Szignifikancia szint (p)	0,228	0,102	0,013	0,038	0,662	0,437	0,577	0,928

Megjegyzés: ** jelentése: $p < 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p < 0,05$ szignifikancia szint.



64. ábra: A proteáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari termofil rothasztó toronyban



65. ábra: A lipáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari termofil rothasztó toronyban

Az üzemi, termofil körülmények között a proteáz enzimaktivitások körülbelül 1-2 napos eltéréssel, míg a lipáz aktivitások szinte azonnal jelezték a fajlagos szervesanyag terhelés változását. A fajlagos szervesanyag terhelés és a lipáz enzimaktivitás között pozitív szignifikáns korreláció van ($R = 0,640$, $p < 0,01$, $n = 27$) (31. táblázat). A fajlagos szervesanyag terhelés és a proteáz enzimaktivitás között 1, illetve 2 napos eltéréssel találtam korrelációt ($R_{1 \text{ napos}} = 0,480$, $p < 0,05$; $R_{2 \text{ napos}} = 0,679$, $p < 0,01$, $n = 27$). Az R értékek és a szignifikancia szinteket figyelembe véve elmondható, hogy 2 napos időcsúsztatással erősebb a kapcsolat a két vizsgált tényező között. Fajlagos gázmennyiség és a szubsztrát specifikus enzimaktivitások között csak egy napos időeltolással tudtam szignifikáns kapcsolatot kimutatni ($R_{\text{proteáz}} = 0,398$, $p < 0,05$; $R_{\text{lipáz}} = 0,462$, $p < 0,05$, $n = 28$) (31. táblázat).

31. táblázat: A termofil kísérleti periódus korrelációs adatai (n=28)

		Időeltolás nélkül		1 napos időeltolással		2 napos időeltolással		3 napos időeltolással	
		Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.	Proteáz enzimakt.	Lipáz enzimakt.
Fajlagos szervesanyag terhelés	Korrelációs együttható (R)	0,355	0,640**	0,480*	0,395*	0,679**	0,238	0,222	0,049
	Szignifikancia szint (p)	0,064	0,000	0,039	0,046	0,001	0,068	0,285	0,814
Fajlagos gázmennyiség	Korrelációs együttható (R)	0,355	0,107	0,398*	0,462*	0,161	0,106	0,272	0,312
	Szignifikancia szint (p)	0,064	0,586	0,036	0,035	0,433	0,605	0,188	0,129

Megjegyzés: ** jelentése: $p \leq 0,01$ szignifikancia szint, * jelentése: $p \leq 0,05$ szignifikancia szint.

4.3.6. Mechanikai előkezelés (roncsolás) hatásának vizsgálata

A biogáz mennyiségének növelése érdekében mechanikai roncsolást (kavitációt) alkalmaztam ötnapos kísérletsorozatban, mezofil hőmérsékleten a félüzemi reaktorokban. Az I. számú félüzemi reaktor kontrollként szolgált, míg a II. számú félüzemi reaktorba előzetesen mechanikailag roncsolt iszapot tápláltam. A legfontosabb üzemeltetési paraméterek átlagértékeit a 32. táblázatban foglaltam össze a kísérleti periódus alatt (n=7). A kísérleti periódus részletesebb bemutatására a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. titoktartási kérelmének megfelelően nincs lehetőségem.

32. táblázat: A kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=7) a félüzemi reaktorokban

Paraméterek	I. reaktor	II. reaktor
Hőmérséklet (°C)	35,6±0,1	35,5±0,2
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	3,34±1,00	3,05±1,05
Hidraulikus tartózkodási idő (d)	12	12

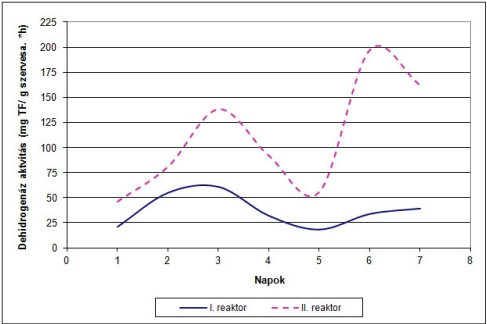
A kísérleti periódus alatt a klasszikus ellenőrző paramétereket, valamint a sejtek összes aktivitását jellemző dehidrogenáz enzimaktivitást vizsgáltam.

4.3.6.1. Az előkezelés (mechanikai roncsolás) hatása a fermentációra kísérletsorozat eredményei

A 66. ábrán a dehidrogenáz enzimaktivitás változása látható a két félüzemi reaktorban. Az ellenőrző paramétereket és a dehidrogenáz enzim aktivitását a félüzemi, mezofil rothasztó berendezésben a 33. táblázatban ismertetem.

Az előkezelés hatására a rothasztáshoz szükséges szubsztrát könnyebben hozzáférhető formában volt jelen az anaerob mikroorganizmusok számára, ezt támasztja

alá a nagyobb dehidrogenáz enzimaktivitás a II. reaktorban, illetve a nagyobb fajlagos gázmennyiség is.



66. ábra: A dehidrogenáz enzimaktivitás változása a félüzemi reaktorokban a kísérleti periódus alatt

33. táblázat: Az ellenőrző paraméterek és az iszap dehidrogenáz aktivitása a félüzemi, mezofil rothasztó berendezésben (n=7)

Paraméter	I. reaktor		II. reaktor	
	Átlag	RSD%	Átlag	RSD%
Fajlagos gázmennyiség (Nm ³ /1000kg szervesa.)	287	38,9	383	43,2
A biogáz metántartalma (%)	55,9	9,7	56,8	10,1
Metán mennyisége (Nm ³ /1000kg szervesa.)	160	26,5	218	27,8
pH	7,2	2,3	7,2	2,4
Lúgosság (mgCaCO ₃ /dm ³)	6452	6	5866	2
Illósav (mgCH ₃ COOH/dm ³)	2578	16	2674	13
Dehidrogenáz aktivitás (mg TF/g szervesa. *h)	36,9	43,7	111	51,3

A mechanikai előkezelés hatására a dehidrogenáz enzimaktivitás az átlagos 36,9±16,1 mg TF/ g szervesa. *h értékről 111±57 mg TF/g szervesa. *h értékre nőtt, amely 201% növekedést jelent. A fajlagos gázmennyiség 287±111 Nm³/1000kg szervesa. értékről 383±166 Nm³/1000kg szervesa. értékre változott, amely 33% növekedést jelent.

A szervesanyag terhelés és a dehidrogenáz enzimaktivitás között a II. reaktor esetén szignifikáns kapcsolatot ($R = 0,392$, $p < 0,05$, $n = 7$) találtam, az I. reaktor esetén ez a kapcsolat a 0,05 szignifikancia szintet ($R = 0,335$, $p = 0,084$, $n = 7$) meghaladó. Hasonló eredményre jutottam a fajlagos gázmennyiség és a dehidrogenáz enzimaktivitás közötti korreláció vizsgálatok során ($R_{\text{I.reaktor}} = 0,360$, $p < 0,05$; $R_{\text{II.reaktor}} = 0,305$, $p = 0,071$, $n = 7$).

4.3.7. Enzimkészítmény alkalmazásának lehetőségei

A laboratóriumi kísérletsorozatban a MethaPlus® enzimkészítményt vizsgáltam. A korábban ismertetett *11. táblázat* tartalmazza az enzimkészítmény fizikai tulajdonságait a szakirodalmi adatok alapján.

A félüzemi kísérletek előtt laboratóriumi elővizsgálatokat végeztem mind a szilárd, mind pedig a folyékony halmazállapotú enzimkészítménnyel. A laboratóriumi elővizsgálatok során mind a két halmazállapotú enzimkészítményből a javasolt, fermentorba adagolandó koncentrációnál 100-szor töményebb ($0,1 \text{ g/dm}^3$) oldatot készítettem. Az így elkészített desztillált vizes enzimkivonat oldatot adagoltam a termofil hőmérsékletű üzemi toronyból származó szennyvíziszaphoz, majd vizsgáltam az enzimaktivitásokat. A termofil hőmérsékletű üzemi toronyból származó iszap alkalmazását az indokolta, hogy a MethaPlus® készítményt szakirodalom alapján termofil hőmérsékleten nem próbálták ki. Az iszapszűrő enzimaktivitás vizsgálatait az általam kidolgozott iszap-szubsztrát arányt és inkubációs időket alkalmazva végeztem.

Az anaerob lebontás nyomon követésére ebben a kísérletsorozatban is az enzimaktivitás vizsgálatokat alkalmaztam. A sejtek összaktivitását jellemző dehidrogenáz-, illetve a szubsztrát specifikus proteáz-, lipáz- és celluláz enzimaktivitások változásait követtem nyomon. Minden esetben a szennyvíziszap enzimaktivitását és a szennyvíziszap-enzimkészítmény rendszer enzimaktivitását vizsgáltam négy eltérő (20°C , 37°C , 45°C , 55°C) hőmérsékleten. A kiválasztott hőmérsékleteket a következők indokolták: a 20°C -os hőmérséklet a szobahőmérsékleten történő vizsgálatokat jelenti. A 37°C és a 45°C -os hőmérsékletek az anaerob lebontás mezofil hőmérsékleti tartományának két kitüntetett pontja. A 37°C a dehidrogenáz, a proteáz és a celluláz, míg a 45°C a lipáz enzimaktivitás meghatározásának szakirodalmi közleményekben szereplő hőmérséklete is. Az 55°C az anaerob lebontás termofil hőmérsékleti optimuma. Minden esetben kontrollként enzimkészítményt nem

tartalmazó iszapminták szolgáltak, amelyeket a többi mintával azonos módon kezeltem. A kontroll mintákhoz viszonyítottam a szilárd és a folyékony enzimmészítményt tartalmazó minták enzimaktivitásait.

4.3.7.1. Enzimmészítmény alkalmazhatóságának vizsgálatai

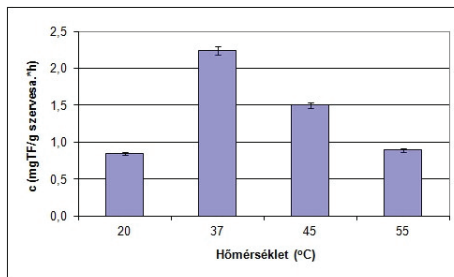
A 0,1 g/dm³ koncentrációjú enzimmészítmény-oldatok tulajdonságai a 34. táblázatban kerülnek bemutatásra.

34. táblázat: A 0,1 g/dm³ koncentrációjú enzimmészítmény-oldatok tulajdonságai

	szilárd MethaPlus®	folyadék MethaPlus®
pH (átlag)	5,63	5,43
Fajlagos elektromos vezetőkép. (μS/cm) (átlag)	10,4	5,6
Reaktív foszfát koncentráció (mg/dm ³)	0,22	0,20
Nitrát koncentráció (mg/dm ³)	7,86	7,04
Szulfát koncentráció (mg/dm ³)	9,92	6,84

A dehidrogenáz aktivitás mérését először a vizes enzimmészítménnyel (folyadék és szilárd halmazállapotúval, iszap nélkül) is elvégeztem. Az inkubáció leteltével nem tapasztaltam enzimaktivitást, így megállapítható, hogy valódi enzimmészítményről van szó és nem liofilizált baktériumkészítményről.

A dehidrogenáz enzimaktivitás mérését az iszapmintákkal a vizsgált négy hőmérsékleten szilárd és folyékony halmazállapotú enzimmészítménnyel végeztem el. A folyékony és szilárd enzimmészítményt tartalmazó minták átlagának eredményeit a 67. ábra mutatja be, amely alapján megállapítható, hogy a legnagyobb enzimtevékenység 37°C-on volt.



67. ábra: Az átlagos dehidrogenáz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken

A 35. táblázat a folyékony és szilárd halmazállapotú enzimek készítmény hatására bekövetkező dehidrogenáz enzimaktivitás növekedését mutatja. A növekedés% mindkét esetben az enzimek készítmény nem tartalmazó vakmintához való viszonyítást jelenti a vizsgált hőmérsékleteken.

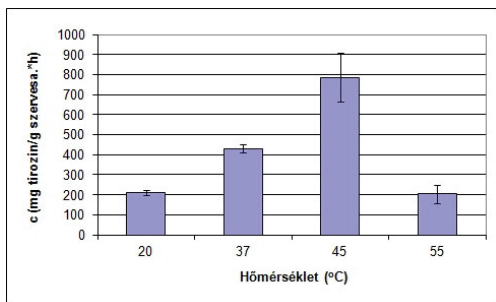
35. táblázat: A dehidrogenáz enzimaktivitás növekedés a folyékony és a szilárd halmazállapotú enzimek készítmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)

Hőmérséklet (°C)	Növekedés (%) MPf esetén	Növekedés (%) MPsz esetén
20	3,6	5,9
37	14,9	19,2
45	3,8	7,1
55	2,6	3,9

Magyarázat: MPf = folyékony halmazállapotú MethaPlus®, MPsz = szilárd halmazállapotú MethaPlus®

A proteáz enzimaktivitás vizsgálatát is mind a négy hőmérsékleten elvégeztem folyékony, illetve szilárd enzimek készítményt alkalmazva. Minden esetben a reakcióelegy térfogata 6,0 cm³ volt, amely mindig azonos mennyiségű szubsztrátot (L-kazein), szennyvíziszapot, illetve desztillált vizet vagy az enzimek készítmény vizes oldatát tartalmazta.

A proteáz aktivitás a vizsgált négy hőmérséklet közül 45°C-on volt a legnagyobb, és ekkor tapasztaltam a legnagyobb növekedést az enzimek készítmény nem tartalmazó vakmintákhoz viszonyítva, melyet a 68. ábra is szemléltet. Az ábra a folyékony és a szilárd enzimek készítményt tartalmazó minták átlagait tartalmazza.



68. ábra: Az átlagos proteáz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken

A 36. táblázat a két különböző halmazállapotú enzimekcsíztmény hatására bekövetkező proteáz enzimaktivitás növekedését mutatja. A növekedés% mindkét esetben az enzimekcsíztményt nem tartalmazó vakmintához való viszonyítást jelenti.

36. táblázat: A proteáz enzimaktivitás növekedés a folyékony és a szilárd halmazállapotú enzimekcsíztmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)

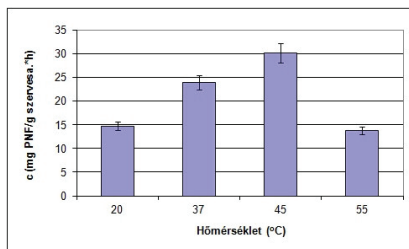
Hőmérséklet (°C)	Növekedés (%) MPf esetén	Növekedés (%) MPsz esetén
20	n.d.	78,1
37	20,6	8,3
45	71,4	46,0
55	-49,2	-69,0

Magyarázat: MPf = folyékony halmazállapotú MethaPlus®, MPsz = szilárd halmazállapotú MethaPlus®

A szilárd halmazállapotú enzimekcsíztményből készült oldat alkalmazása esetén az enzimaktivitás növekedés 20°C-on 78% volt, míg 45°C-on átlagosan 46,1% volt (29. táblázat). A folyékony halmazállapotú enzimekcsíztmény hatására 71%-os növekedést tapasztaltam 45°C-on. 55°C-on átlagosan 69%-os, míg folyadék halmazállapotú enzimekcsíztmény hatására 49%-os csökkenés volt tapasztalható. Valószínűsíthető, hogy az 55°C-os hőmérséklet már gátló hatást fejt ki az enzimekcsíztmény alkalmazásakor.

A lipáz enzimaktivitás mérését is – folyékony és szilárd halmazállapotú enzimekcsíztményt alkalmazva – a kiválasztott négy hőmérsékleten elvégeztem. A legnagyobb enzimtevékenységet ebben az esetben 37°C-on tapasztaltam (69. ábra). A félüzemi és az üzemi szinten is a lipid-terhelés növekedést jól nyomon követő lipáz enzimaktivitás az enzimekcsíztmény hatására több esetben kisebb abszorbanciát mutatott a MethaPlus®-oldatot nem tartalmazó vakmintákhoz képest. A folyékony halmazállapotú enzimekcsíztmény esetén a hőmérsékletemelés egyértelműen gátló hatást fejtett ki (37. táblázat).

Megállapítható mérési eredményeim alapján, hogy a vizsgált enzimekcsíztmény csak mezofil körülmények közt fejt ki hatását.



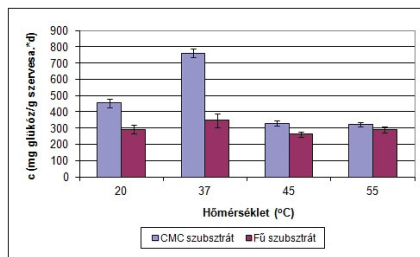
69. ábra: Az átlagos lipáz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken

37. táblázat: A lipáz enzimaktivitás növekedés a folyékony és a szilárd halmazállapotú enzimesztmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)

Hőmérséklet (°C)	Növekedés (%) MPf esetén	Növekedés (%) MPsz esetén
20	22,7	45,7
37	16,6	62,6
45	-58,5	32,1
55	-60,2	2,6

Magyarázat: MPf = folyékony halmazállapotú MethaPlus®, MPsz = szilárd halmazállapotú MethaPlus®

A celluláz enzimaktivitás mérését csak szilárd halmazállapotú enzimesztménnyel végeztem el a négy hőmérsékleten, de ez esetben szubsztrátként könnyen bomló karboxil-metil-cellulózt (CMC), illetve előkezelt (szárított, darált) fűvet adtam.



70. ábra: Az átlagos celluláz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken a szilárd enzimesztmény hatására CMC, illetve fű szubsztrát esetén

Mind a négy vizsgált hőmérsékleten a cellulóz származék (CMC) esetén nagyobb aktivitást tapasztaltam, hiszen ez a vegyület könnyen hozzáférhető tápanyagot

jelent a mikroorganizmusok számára. A legnagyobb enzimaktivitást 37°C-on tapasztaltam (70. ábra).

Az enzimesztítmény hatására 20°C-on és 37°C-on mindegyik minta aktivitása nőtt, a nagyobb növekedés a CMC esetén volt tapasztalható (42,6%). Az enzimesztítmény hatására 45°C-on kisebb növekedést tapasztaltam, mint 37°C-on. A hőmérséklet tekintetében a mezofil hőmérséklet látszik ez esetben is kedvezőbbnek (38. táblázat).

38. táblázat: A celluláz enzimaktivitás növekedés a szilárd enzimesztítmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)

Hőmérséklet (°C)	Átlagos növekedés (%)	
	CMC esetén	Fű esetén
20	24,4	-16,9
37	42,6	14,9
45	5,0	<0,1
55	4,8	1,4

Az előzetes laboratóriumi statikus kísérletek alapján megállapítható, hogy az enzimesztítmény alkalmazása növelte az enzimaktivitásokat. A korábbi tapasztalataimra támaszkodva megállapítható, hogy a növekvő enzimtevékenység alapján növekvő biogáz kihozatal várható. A kísérleti tapasztalataim alapján a szilárd halmazállapotú készítmény esetén nagyobb enzimaktivitás növekedést tapasztaltam, ezért és a könnyebb kezelhetősége miatt mezofil hőmérsékletű félüzemi fermentorban a szilárd halmazállapotú készítmény alkalmazását javasoltam a szennyvíztisztító telep vezetésének. Sajnos, erre a félüzemi kísérletsorozatra az eddigiekben még nem kerülhetett sor.

4.3.8. Szennyvíziszap és szervesanyagok együtt rothasztásának (növényi hulladék koszubsztrát hatása) bemutatása félüzemi reaktorban

A kísérleti munkám ezen részét a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepén lévő III. számú félüzemi fermentorban végeztem közel négy hónapig. Ennek során termofil körülmények között cellulóz hulladék (előzetesen szárított, aprított fű) szennyvíziszappal történő együttes rothasztása történt. A fű hulladék adagolását megelőzte egy 36 napig tartó kontroll időszak, amely alatt a fermentorba csak szennyvíziszap betáplálás történt. A kontroll időszakot 76 napos fűbetáplálási periódus követte, amely alatt minden munkanap 1,5 kg szárított, darált fűvet adagoltam a

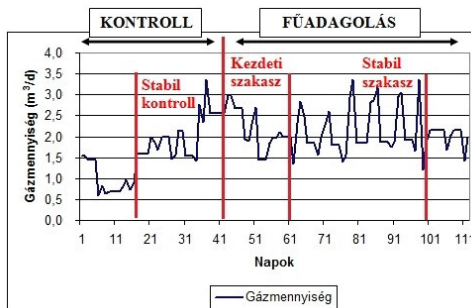
200 dm³ szennyvíziszap mellett. A kísérletsorozat beindulása előtt előzetes kísérletek eredményeképpen a napi 1,5 kg szárított, darált fű volt az a mennyiség, amely dugulást nem okozott, így a rendszer biztonságos üzemeltetését lehetővé tette. A folyamatokat a klasszikus ellenőrző paraméterek (pH, illósav, lúgosság, gázmennyiség, gázösszetétel) mellett nyomon követtem enzimaktivitás vizsgálatokkal. Kiemelt helyen kezeltem a szubsztrát specifikus celluláz és proteáz enzimaktivitás méréseket. Az üzemeltetési paramétereket a 39. táblázat tartalmazza.

39. táblázat: A félüzemi kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei a kontroll időszak (n=36), illetve fűadagolási időszak (n=76) alatt a termofil hőmérsékletű fermentorban

Paraméterek	Kontroll időszak	Fűadagolási időszak
Hőmérséklet (°C)	54,2±2,7	54,8±1,3
Fajlagos szervesanyag terhelés (kg/m ³ *d)	2,35±0,95	4,95±1,21
Hidraulikus tartózkodási idő (d)	16±1,3	17±1,3

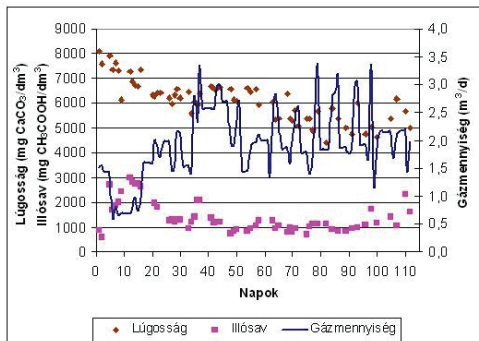
4.3.8.1. Szennyvíziszap és szervesanyagok együtt rothasztásának (növényi hulladék koszsusztrát hatása) vizsgálati eredményei félüzemi reaktorban

A kontroll időszak átlagos gáztermelése 1,49 Nm³ volt naponta, a fűadagolás hatására átlagosan 2,19 Nm³ gáz képződött, ez 47% növekedést jelentett (71. ábra), amely fajlagos gázmennyiségre átszámolva 33% növekedést jelent.



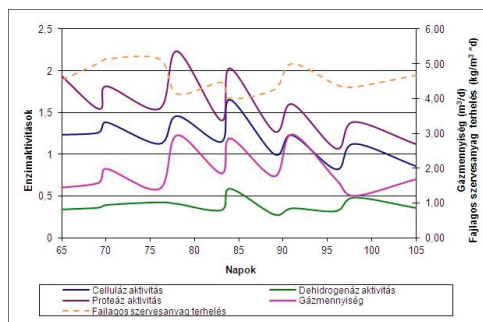
71. ábra: A gázmennyiség változása a kísérleti periódus alatt

A kísérleti periódus teljes ideje alatt a klasszikusnak számító ellenőrző paraméterek nem mutattak megfelelő kapcsolatot a fermentorban bekövetkező változásokkal, illetve a gázmennyiséggel (72. ábra).



72. ábra: Az ellenőrző paraméterek változása a koszsusztrát fermentáló kísérleti periódus alatt

Az illósav mennyisége a kezdeti ingadozás után a fűadagolás alatt 1096 ± 48 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{dm}^3$ értékre állt be. A rendszer pufferekapacitását jelentő lúgosság értéke a kontroll időszakhoz képest csökkent, a fűadagolás alatt átlagosan 5850 ± 485 mg $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$ értéket ért el. Ezzel szemben a celluláz és a proteáz enzimaktivitás a napi gázmennyiséggel összhangban változott (73. ábra).



73. ábra: A celluláz, a proteáz, a dehidrogenáz enzimaktivitások változása a kísérleti periódus stabil fűbetáplálási időszakában (75. – 100. nap)

Enzimaktivitások mértékegységei: celluláz aktivitás: g glükóz/g szervesa.*d, proteáz aktivitás: mg tirozin/g szervesa.*h, dehidrogenáz aktivitás: mg TF/g szervesa.*d.

Növényi hulladék adagolása esetén az SPSS programcsomaggal lefuttatott korrelációanalízis a szervesanyag terhelés és az enzimaktivitások között gyenge kapcsolatot mutatott. A celluláz esetén $R_{\text{celluláz}} = 0,342$, $p = 0,048$, a dehidrogenáz esetén $R_{\text{dehidrogenáz}} = 0,315$, $p = 0,068$, a proteáz esetén $R_{\text{proteáz}} = 0,324$, $p = 0,052$, a lipáz esetén pedig $R_{\text{lipáz}} = 0,404$, $p = 0,070$ volt.

A fajlagos gázmennyiség és a proteáz, valamint a celluláz enzimaktivitások között viszont erős kapcsolatot ($R_{\text{proteáz}} = 0,992$, $p < 0,01$; $R_{\text{celluláz}} = 0,997$, $p < 0,01$) találtam a stabil fűadagolási időszakban (75.-100. nap között).

Kísérleteim alapján megállapítható, hogy az alkalmazott iszap-fű keverék az anaerob mikroba populáció számára megfelelő tápanyagot jelentett. A megváltozott szubsztrát terhelést jól jelezték enzimaktivitás eredményeim. A gáztermelés feltétele a szubsztrát bonthatósága, a lebontási sebesség, amely enzimaktivitástól függően változik, így érzékenyen követhetővé vált ezen paraméterek vizsgálatával. Tapasztalataim alátámasztották, hogy hidrolitikus enzimaktivitással jellemezhető a biogáz termelés.

Kísérleti munkám során bebizonyítottam, hogy cellulóz hulladék (külső szubsztrát) szennyvíziszappal történő együttes rothasztásával növelhető a biogáz mennyisége. A fű elméleti biogázpotenciáját ($0,4-0,5 \text{ Nm}^3$ biogáz/kg száraz szerves fű, Barta 2002, Garai 2002) figyelembe véve az üzemeltetés során az elméletileg elérhetőhöz képest kb. 70% biogáz-kihozatalt értünk el. A klasszikus ellenőrző paraméterekkel nem tudtam nyomon követni a megváltozott szubsztrát terhelést. A folyamatok nyomon követésére a szubsztrát specifikus celluláz és proteáz enzimaktivitás a korreláció vizsgálatok alapján megbízhatóan bizonyult.

5. Az enzimaktivitás mérések gyakorlati jelentősége

Az általam alkalmazott enzimaktivitás vizsgálatokkal nyomon követhetjük az anaerob fermentáció hidrolízis folyamatát, amely a lebontás és így a biogázképződés sebességmeghatározó lépése. A hidrolízis folyamatának részletesebb megismerésével tehát a biogáztermelés alakulásáról is információt szerezhetünk, amely így a rothasztók üzemeltetői számára kellő információt szolgáltat a gazdaságos üzemeltetéshez.

Célszerűnek tartom a klasszikus ellenőrző paraméterek közé bevonni az enzimaktivitás vizsgálatokat is, hiszen az eddigi ellenőrző paraméterek (kémhatás, illósav, lúgosság, gázmennyiség, gázösszetétel) önmagukban nem adnak megfelelő információt a fermentorban végbemenő folyamatokról.

A hidrolitikus enzimaktivitás mérésekkel kiegészült ellenőrző paraméterek segítségével komplexebb képet kaphatnak az üzemeltetést végző szakemberek a reaktorban bekövetkező változásokról és rutinszerű alkalmazásuk hozzájárulhat a fermentorok optimális üzemeltetéséhez. Az enzimaktivitás vizsgálatok rutinszerű alkalmazásával monitorozható a fermentorban bekövetkező változások.

Gyakori szubsztrát változás esetén az anaerob rendszer adaptációjáról és aktivitásáról az enzimaktivitás mérésekkel szintén gyors választ kaphatunk. Az iszap gyakori fehérje-tartalmának változása esetén a proteáz, gyakori zsír-tartalom változás esetén a lipáz, növényi hulladék adagolás esetén pedig a celluláz enzimaktivitás alkalmas a folyamatok nyomon követésére. A szubsztrát összetételének hatására a hidrolitikus enzimaktivitás (proteáz, lipáz, celluláz) értékei gyorsabban jelzik a folyamat egyensúlyának változását, mint a hagyományos ellenőrző paraméterek. A dehidrogenáz enzimaktivitás pedig az alapvető üzemeltetési paraméterek (pl.: hőmérséklet) változására hívja fel a figyelmet.

Az egyszerűsített enzimaktivitás méréseket ma már a gyakorlatban is viszonylag gyorsan el lehet végezni. A mérés elvégzéséhez nem szükséges különleges felszereltséggel rendelkező laboratórium, a mérések viszonylag gyorsan és olcsón kivitelezhetők.

6. Összefoglalás

Céлом volt, hogy az enzimaktivitás mérések klasszikus üzemellenőrző paraméterek melletti alkalmazhatóságát az anaerob biogáz termelő fermentáció során tanulmányozzam. Az enzimaktivitás mérésekkel ugyanis jól nyomon követhető az anaerob lebontás sebesség meghatározó lépése, a hidrolízis folyamata. Az alkalmazott enzimaktivitás mérésekkel nyomon követhető az anaerob fermentorokban végbemenő (hőmérséklet, fajlagos szervesanyag terhelés) változások, amelyek hatással vannak a képződő biogáz mennyiségére.

Az enzimaktivitás vizsgálatok alkalmazása előtt felülvizsgáltam és adaptáltam az enzimaktivitás méréseket. Vizsgáltam a szubsztrát – iszap (koncentráció és térfogat) arányát, valamint optimalmáltam a reakció körülményeit: az inkubálás hőmérsékletét és idejét, valamint a proteáz mérés esetén a kémhatást is.

A mezofil és termofil hőmérsékletű félüzemi és üzemi kísérletek alapján megállapítottam, hogy az iszaprohasztás gyakorlatában alkalmazott klasszikus ellenőrző paraméterek (szárazanyag-, szervesanyag-tartalom, kémhatás, illósav, lúgosság, redoxipotenciál) közül csak az illósav koncentrációja mutatott korrelációt a fajlagos szervesanyag terheléssel, illetve a hőmérséklet változtatásával. Az illósav koncentrációja és a fajlagos gázmennyiség között negatív korrelációt állapítottam meg.

Az általam kifejlesztett fajlagos dehidrogenáz enzimaktivitás mérés alkalmasnak bizonyult az anaerob módon fermentált szennyvíziszap biokémiai jellemzésére, azaz az iszapsejtek összaktivitás-változásainak nyomon követésére. Az anaerob iszap jellemzésére optimalmált fajlagos proteáz, fajlagos lipáz és fajlagos celluláz enzimaktivitás meghatározása - félüzemi és üzemi körülmények között végzett kísérleteim tanúsága szerint - a fermentorokba táplált szubsztrát gyakori összetétel változásának kimutatására alkalmazható. A nagy fehérje- és zsírtartalmú szubsztrát adagolás esetén a proteáz és a lipáz, míg növényi hulladék adagolás hatásának nyomon követésére a celluláz aktivitás vizsgálata bizonyult megfelelőnek.

Mind félüzemi, mind pedig üzemi körülmények között igazoltam, hogy a termofil hőmérsékletű iszaprohasztás során a mezofil rendszerekben meghatározottakhoz képest a fajlagos dehidrogenáz enzimaktivitás nagyobb. Megállapítottam továbbá, hogy a termofil hőmérsékletű rohasztásnál nemcsak a dehidrogenáz, hanem a szubsztrát specifikus proteáz- és lipáz enzimaktivitás értéke is meghaladja a mezofil hőmérsékletű rendszerben mért aktivitás értékeket.

Félüzemi körülmények között igazoltam, hogy a fajlagos dehidrogenáz enzimaktivitás alkalmas a hőmérséklet változtatás hatásainak nyomon követésére és korrelációt mutat a képződött biogáz mennyiségével. Ezt alátámasztották a két félüzemi reaktorral végzett hőmérséklet átüzemelési kísérleti periódus adatai, valamint a félüzemi fermentorban bekövetkezett műszaki probléma okozta drasztikus hőmérséklet emelkedés esetén az enzimaktivitás és a biogáz kihozatal kapcsolatára meghatározott korrelációs adatok.

Félüzemi és üzemi körülmények között végzett kísérleteim tapasztalatai szerint mezofil és termofil hőmérsékleten egyaránt a fajlagos szervesanyag terheléssel szoros korrelációt mutattak a proteáz és a lipáz enzimaktivitások. A proteáz enzimaktivitás egy-két napos, míg a lipáz enzimaktivitás maximum egy napos eltolódással jelezte a fajlagos szervesanyag terhelés változását.

Félüzemi és üzemi körülmények között mind mezofil és termofil hőmérsékleten a proteáz és a lipáz enzimaktivitások és a fajlagos gázmennyiség között is korrelációt találtam. A proteáz és a lipáz enzimaktivitás egy-két napos eltolódással jelezte a fajlagos gázmennyiség változását.

Félüzemi mezofil körülmények között végzett előkezelési kísérletek alapján megállapítottam, hogy az ultrahanggal történt előkezelés hatására a kontroll reaktor fajlagos gázmennyiségéhez viszonyítva 33% gáztérfogat növekedés tapasztalható. Az előkezelést alkalmazó fermentáció során a dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés, illetve a fajlagos gázmennyiség között szignifikáns kapcsolatot mutattam ki. A biogáz mennyiségének növelése érdekében laboratóriumi körülmények között, mezofil hőmérsékleten végzett előkezelési kísérletek alapján pedig megállapítottam, hogy az alkalmazott enzimmészítménnyel növelhető az iszap dehidrogenáz, a proteáz, a lipáz és a celluláz enzimaktivitása.

A növényi koszubsztráttal végzett félüzemi kísérlet során meghatároztam, hogy a szennyvíziszaphoz adagolt fű hatására - optimált terhelési viszonyok közt - 33%-kal megnövelhető a fajlagos gázmennyiség. A stabil fűadagolási időszakban a fajlagos gázmennyiség és a proteáz, valamint a celluláz enzimaktivitások között szignifikáns kapcsolatot találtam.

Az általam kidolgozott enzimaktivitás vizsgálatokkal megbízható információt nyertem a változó technológiai paraméterek (fajlagos szervesanyag terhelés, hőmérséklet, koszubsztrát jelenléte, az előkezelések) gázhozamra gyakorolt hatásaira. A viszonylag olcsón és gyorsan kivitelezhető enzimaktivitás vizsgálatokkal kiegészített

ellenőrző paraméterek együttes vizsgálata – kísérleti tapasztalataim alapján – már kellő információt szolgáltat az üzemeltetés számára az anaerob lebontás folyamatairól és így sikeresen járulhat hozzá a termelt biogáz mennyiségének növeléséhez.

7. Summary

My aim was to study the applicability of enzyme activity measurements with classical plant controlling parameters in the course of anaerobic biogas producing fermentation. The reason was that through enzyme activity measurements the decisive steps of the anaerobic decomposition speed; i.e. process of the hydrolysis can be followed properly. With the used enzyme activity measurements it is possible to follow up those changes (temperature, specific organic matter load) - occurring in the anaerobic fermenters - which have influences on the quantity of the produced biogas.

Before using the enzyme activity tests I reviewed and adapted the measurements of enzyme activity. I studied the substrate/sludge ratio (concentration and volume), and optimized the conditions of reaction: the incubation temperature and period and in the case of the protease measurement the chemical effect also.

On the basis of the semi-plant- and plant experiments at mezophilic and thermophilic temperature I stated that - of the classical control parameters used in the practice of sludge putrefaction (dry material content, organics content, chemical reaction, volatile acid, alkalinity, redoxipotential) - only the concentration of the volatile acid showed any correlation with the specific organic material load and the temperature change, respectively. I stated a negative correlation between the concentration of the volatile acid and the specific gas quantity.

My measurement for the specific dehydrogenase enzyme activity proved suitable for the biochemical characterization of the waste sludge fermented in an anaerobic way; i.e. for the follow up of changes in the total activity of the sludge cells. As proved by my experiments completed under pilot plant- and plant conditions, determination of the specific protease-, specific lipase- and specific cellulase enzyme activities – optimized for the specification of the anaerobic sludge – can be applied for presenting the frequent composition changes of substrates fed in the fermenters. If a substrate with large protein- and fat content is fed, the checking of the protease and lipase is suitable to follow up the effect, while in the case of vegetable waste supply, checking of the cellulase activity proved suitable.

I verified both under pilot plant- and plant conditions that the specific dehydrogenase enzyme activity is higher in the course of sludge putrefaction of thermophilic temperature if compared to the one determined in the mezophilic systems. In addition I stated that in the course of putrefaction of thermophilic temperature, the

value of not only the dehydrogenase enzyme activity but also of the substrate specific protease- and lipase enzyme activities exceeds the activity values measured in the system of mezophilic temperature.

Within pilot plant conditions I verified that the specific dehydrogenase enzyme activity is suitable to follow up the effects of the temperature changes, and that it has a correlation with the quantity of the produced biogas. This was supported by the data of the testing period with temperature changes for two pilot plant reactors, and the correlation data determined for the relation of the enzyme activity and the biogas output in the case of a drastic temperature rise caused by a technical problem occurred in the pilot plant fermenter.

Based on my experiences gained in the course of tests completed under pilot plant- and plant conditions at both mezophilic- and thermophilic temperatures, the protease- and lipase enzyme activities showed strong correlation with the specific organic material load. The protease enzyme activity with a time lag of one/two day(s) while lipase enzyme activity with a time lag of maximum one day reflected the change in the specific organic material load.

Under pilot-plant- and plant conditions I found correlation between the protease- and the lipase enzyme activities and the specific gas volume at both the mezophilic and thermophilic temperatures. The protease- and lipase enzyme activities indicated the change in the specific gas volume with a time lag of one or two day(s).

On the basis of the pre-treatment tests completed under mezophilic pilot plant conditions I stated that - under the influence of ultrasonic preliminary treatment - a gas volume increase of 33 % can be experienced if compared to the specific gas volume of the control reactor. For the fermentation with preliminary treatment I experienced a significant relation between the dehydrogenase enzyme activity and the specific gas volume. And - on the basis of the preliminary treatment tests completed under laboratory conditions at mezophilic temperature in the interest of increasing the biogas quantity - I stated that with the used enzyme product it is possible to increase the dehydrogenase-, protease-, lipase- and cellulase enzyme activities of the sludge.

During the pilot-plant test - completed with vegetable co-substrate - I stated that for the effect of grass added to the waste sludge under optimum loading conditions it is possible to increase the specific gas quantity with 33 %. Within stable grass feeding period I found a significant relation between the specific gas quantity and the protease- and cellulase enzyme activities, respectively.

Through my enzyme activity tests I gained reliable information on the influences of the varying parameters (specific organic material load, temperature, the presence of a co-substrate, preliminary treatments) on the gas output. On the basis of my experimental data, joint testing of the control parameters - supplemented with the relatively cheaply and quickly completed enzyme activity tests – can provide adequate information for the operation regarding the processes of the anaerobic decomposition, and thus it can successfully contribute to the increase of the produced biogas quantity.

8. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni mindazoknak, akik disszertációm elkészítésében segítségemre voltak:

Prof. Dr. Záray Gyula egyetemi tanárnak, témavezetőmnek, hogy kutatómunkámat lehetővé tette és támogatta. Köszönöm a lehetőséget, hogy doktori tanulmányaimat a **Környezettudományi Kooperációs Kutató Központ** keretein belül folytathattam.

Dr. Barkács Katalin egyetemi adjunktusnak, konzulensemnek iránymutatásaiért a kutatás elméleti és kísérleti részeiben, a publikációk és a jelen értekezés elkészítésében nyújtott önzetlen segítségéért és hasznos tanácsaiért, bátorításáért, valamint a sok szeretetért, amelyet a munkám során kaptam.

Köszönet **Segesdi Józsefné** technikusnak a laboratóriumi segítségért, azokért a fortélyokért, amelyeket megtanulhattam Tőle.

A **Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.** részéről **Dr. Oláh József** tudományos tanácsadónak, konzulensemnek külön köszönetemet fejezem ki a támogatásáért. Külön köszönet illeti a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. **Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep** valamennyi munkatársát a fermentorok üzemeltetéséért. A **Kutatás-fejlesztési és Laboratóriumi Csoport** valamennyi munkatársának köszönöm önzetlen segítségüket, valamint, hogy a szennyvíztelepi laboratóriumban végzett munkám során kollégájaknak tekintettek és mindenben segítettek.

Külön köszönetemet fejezem ki **Sárközi Edit** doktorandusznek (Budapesti Corvinus Egyetem Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék) a korrelációs vizsgálatok terén, valamint a szerkesztésben nyújtott kimagasló segítségéért.

Köszönöm Feleségemnek, **Dr. Angyal Zsuzsannának** a segítségét, a támogatását és a türelmét. Köszönöm gyermekeim, **Zétény** és **Zalán** türelmét, hogy a dolgozat írása az együtt eltöltött idő rovására ment.

9. Irodalomjegyzék

50/2001. (IV.3.) Kormányrendelet a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól.

75/2002. (VIII. 16.) FVM rendelet a klasszikus sertéspestis és az afrikai sertéspestis elleni védekezéstről

40/2008. (II. 26.) Kormányrendelet a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól szóló 50/2001.(IV.3.) kormányrendelet módosításáról

16/2011. KöM rendelet: A hulladékok jegyzékéről szóló 16/2001. rendelet 1. számú melléklete

91/271/EGK A települési szennyvíz tisztításáról szóló irányelv fogalmai és meghatározásai
Ahring B.K. (1994): Status on science and application of thermophilic anaerobic digestion. *Water Science and Technology*. 30(12). 241-249.

Aitken M.D., Mullenix R.W. (1992): Another look at thermophilic anaerobic digestion of wastewater sludge. *Water Environment Research*. 64(7). 915-919.

Analysis of soil biological activity by method of dehydrogenase enzyme activity (1986): Soil analysis of agricultural land treated with sewage and sewage sludge. MSZ-08-1721/3-86 (Hungarian Standard), Budapest, Hungary.

Bai A. (szerk.) (2005): A biogáz előállítása – Jelen és jövő. Szaktudás Kiadó Ház. Budapest. 33-42., 120-129.

Bai A. (szerk.) (2007): A biogáz. Száz Magyar Falu Könyvesháza Kht. Budapest. 37-48., 119-128.

Baier U., Schmidheiny P. (1997): Enhanced anaerobic degradation of mechanically disintegrated sludge. *Water Science and Technology*. 36(11). 137-143.

Balázs L. (1996): A kémia története I.–II. kötet. Nemzeti tankönyvkiadó. Budapest. 223-226., 302., 312-315., 342.

Barta I. (2002): Az agrár-környezetvédelemben rejlő megújuló energiaforrások. *Agrárroktatás*. 4. 4-6.

Barótfi I. (szerk.) (2005): Környezettechnika. Mezőgazda Kiadó. Budapest. 501-552.

Benedek P., Oláh J. (1973): Anaerob és aerob iszapkezelés. Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató. Budapest. 58. 13-59.

Benefield L. D., Randall C. W. (1980): Biological process design for wastewater treatment. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. N. J. 256-259., 293-319., 460-464.

Bitton G. (2005): *Wastewater Microbiology* (3th edition). John Wiley and Sons, Inc., New Jersey. 345-354.

BS EN ISO 23753-1:2011. Soil quality. Determination of dehydrogenase activity in soil. Method using triphenyltetrazolium chloride (TTC)

Buswell A.M. (1958): Septic tank to controlled digestion. In: McCabe B. J., Eckenfelder W. W. (ed.): Biological treatment of sewage and industrial wastes. Anaerobic digestion and solids-liquid separation. 2. 3-8.

Buswell A. M., Hatfield W. D. (1937): Anaerobic fermentations. Urbana. Illionis. 38-59., 67-69.

Csaba L., Kiss O., Szinay M., Vermes L. (1978): Hígrágya-hasznosítás. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest. 291-292.

Chu C. P., Chang B. V., Liao G. S., Jean D. S., Lee D. J (2001): Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge. Water Research. 35(4). 1038-1046.

Davidson L.N. (1978): Hydrolysis. In: De Renzo D.J. (ed.): Unit operations for treatment of hazardous industrial wastes. 611-631.

Delgenès J. P., Penaud V., Moletta R. (2003): Pretreatments for enhancement of anaerobic deigestion of solid wastes. In: Mata-Alvares J. (ed.) (2003): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA Publishing. 201-228.

Deng S. P., Tabatabai M. A. (1994): Cellulase activity of solis. Soil Biology and Biochemistry. 26(10). 1347-1354.

Dienes D. (2006): Celluláz enzimek hatása a szekunder rostok tulajdonságaira (Biotechnológia a páíriparban). Doktori értekezés. BME Mezőgazdasági Kémiai Technológiai Tanszék. 13-14.

DS 296:1984. Vandundersøgelse. Hæmning af aktiveret slams dehydrogenaseaktivitet målt ved TTC-metoden Hæmning af aktiveret slamsdehydrogenaseaktivitet målt ved TTC-metoden kan anvendes ved bestemmelsen af hæmningseffekten af - kemiske stoffer og produkter; industrispildevand; andre vandtyper.

Fahmy A. R., Walsh E. O'F. (1952): The quantitative determination of dehydrogenase activity in cell suspensions. Biochemical Journal. 51(1). 55-56.

Fair G. M., Moore E. W. (1934): Time and rate of sludge digestion and their variation with temperature. Sewage Works Journal. 6(1). 3-13.

Fairbridge R. A., Willis K. J., Booth R. G. (1951): The direct colorimetric estimation of reducing sugars and other reducing substances with tetrazolium salts. Biochemical Journal. 49(4). 423-427.

Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. (1999): Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep (belső felhasználású anyagok). Budapest.

Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. (2007): Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep (szakmai ismertető kiadvány). Budapest.

Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. (2008): Biogáztermelés szennyvízből (szakmai ismertető kiadvány). Budapest.

Garai T. (2002): Hulladékok energetikai és biológiai hasznosítása (FCSM Zrt. belső anyaga). Budapest.

- Garami T., Göbel J., Párnyai Z. (1972): Budapest csatornázása. Mezőgazdasági Könyvkiadó, Budapest.
- Garber W.F. (1982): Operating experience with anaerobic digestion. *Journal WPCF* 54(8). 1170-1175.
- García C., Hernandez T., Albaladejo J., Castilla V., Roldan A. (1998): Revegetation in semiarid zone: influence of terracinn and organic refuse on microbial activity. *Soil Science Society of America Journal*. 62. 670-676.
- Gerardi M. H. (2003): *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley and sons. 11-57.
- Goel R., Mino T., Satoh H., Matsuo T (1998): Enzyme activities under anaerobic and aerobic conditions in activated sludge sequencing batch reactor. *Water Research* 32(7). 2081-2088.
- Goulecke C. (1958): Temperature effects on anaerobic digestion of raw sewage sludge. *Sewage Industrial Wastes*. 30-35. 1225.
- Griebe T., Schaulé G., Wuertz S. (1997): Determination of microbial respiratory and redox activity in activated sludge. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 19(2). 118-122.
- Hattingh W. H. J., Kotze J. P., Thiel P. G., Thoerien D. F., Siebert M. L. (1967): Biological changes during the adaption of an anaerobic digester to a synthetic substrate. *Water Research*. 1(4). 255-277.
- Henze M., Mladenovski C. (1991): Hydrolysis of particulate substrate by activated sludge under aerobic, anoxic and anaerobic conditions. *Water Research*. 25(1). 61-64.
- Heukelekain H. (1958): Basic principles of sludge digestion. In: McCabe B. J., Eckenfelder W. W. (ed.): *Biological treatment of sewage and industrial wastes. Anaerobic digestion and solids-liquid separation*. 2. 25-43.
- Hills D. J., Schroeder E. D. (1969): Temperature effects on the rate of methane fermentation. *Water Sewage Works*. 6. 46-51.
- Hunyadi L., Vita L. (2003): *Statistika közgazdászoknak. Második javított kiadás*. Budapest. 409-410.
- Hunyadi L., Vita L. (2008): *Statistika I. AULA Kiadó. Budapest*. 168-174.
- Iranpour R. O. S., Cox H. J., Shao Y. J., Moghaddam O., Kearney R.J., Deshusses M. K., Stenstrom M. K., Ahring B. K. (2002): Changing mesophilic wastewater sludge digestion into thermophilic operation at Terminal Island Plant. *Water Environment Research* 74(5). 494-507.
- ISO 23753-1:2005. Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität in Böden - Teil 1: Verfahren mit Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC).
- Johnson S. L. (1978a): Biological treatment: anaerobic digestion. In: De Renzo D.J. (ed.): *Unit operations for treatment of hazardous industrial wastes*. 217-229.
- Johnson S. L. (1978b): Biological treatment: enzymes. In: De Renzo D.J. (ed.): *Unit operations for treatment of hazardous industrial wastes*. 241-251.

Kardos L., Juhas K. (2011): Kommunális szennyvíziszap hasznosítási lehetőségek, kiemelt tekintettel a mezőgazdasági hasznosítás (tápanyag visszapótlás) lehetőségeire. Műhelytanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-09/1/KMR-2010-0005 azonosítójú projekt keretében. Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar, Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék. Budapest.

Kim H. J., Choi Y. G., Kim D. H., Kim D. Y., Chung T. H. (2005): Effect of pretreatment on acid fermentation of organic solid waste. *Water Science and Technology*. 52(1-2). 153-160.

Klapwijk A., Drent J., Steenvoorden J. H. (1974): A modified procedure for the TTC-dehydrogenase test in activated-sludge. *Water Research*. 8(2), 121-125.

Kovács R. (szerk.) (2003): A szennyvíziszap-kezelés és hasznosítás jogi, gazdasági, műszaki, környezet-egészségügyi feltételrendszere (tanulmány). EMLA Alapítvány a Környezeti Oktatás támogatására. Budapest. 49-98.

Kun E., Aboud L. G. (1949): Colorimetric estimation of succinic dehydrogenase by triphenyltetrazolium chloride. *Science*. 109. 144-146.

Kunz P. M., Wagner S. (1996): Erkenntnisse und Erfahrungen aus praktischen Anwendungen der Klärschlamm-Desintegration. *Korrespondenz-Abwasser*. 43(7). 1289-1298.

Lackey J.B., Hendrickson E.R. (1958): Biochemical bases of anaerobic digestion. In: McCabe B. J., Eckenfelder W. W. (ed.): *Biological treatment of sewage and industrial wastes. Anaerobic digestion and solids-liquid separation*. 2. 9-24.

Lawrance A. W., McCarty P. L. (1969): Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment. *Journal Water Pollution Control Federation*. 41. 1-16.

Lee S.-M., Lin J., Koo Y.-M. (2002): Hydrolysis of paper sludge using mixed cellulase system: Enzymtic Hydrolysis of paper sludge. *Biological Systems Engineering. ACS Symposium Series*. 830. 121-138.

Li Y., Chróst J. R. (2006): Microbial enzyme activities in anaerobic activated sludge model. *Enzyme Microbiological Technology*. 39(4). 568-572.

Li Y., Noike T. (1992): Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment. *Water Science and Technology*. 26(3-4). 857-866.

Lopez J. M., Koopman B., Bitton G. (1986): INT-dehydrogenase test for activated sludge process control. *Biotechnology and Bioengineering*. 28(7). 1080-1085.

Lusk P. (1998). *Methane recovery from animal manures. The current opportunities casebook*. Colorado.

Malina J.F., Pohland F.G. (1992): Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. *Water Quality Management Library*. 7. 2-18, 29-31, 167-184, 194-210.

Marjainé Szerényi Zs., Molnár F., Vermes L., Bisztricky J. (2006): A szennyvíziszap-kezelés és -elhelyezés közgazdasági értékelése. *Gazdálkodás. Gyöngyös*. 50(4). 31-41.

Mata-Alvarez J. (2003): *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA Publishing. 69-83.

- Meynell, P.-J. (1976). *Methane: Planning a digester*. Prism Press, Dorchester. Dorset. 3.
- Miksch K. (1983): The influence of the concentration of dissolved oxygen on the determination of the dehydrogenase activity of activated sludge using the method of TTC test. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. 11(1). 17-21.
- Miksch K. (1985): The influence of the TTC concentration on the determination of activated sludge activity. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. 13(1). 67-73.
- Miksch K. (1988): Selection of the incubation time in determination of the activity of activated sludge with the TTC. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. 16(6). 607-615.
- Moen G., Stensel H.D., Lepistö R., Ferguson J.F. (2003): Effect of solids retention time on the performance of thermophilic and mesophilic digestion of combined municipal wastewater sludges. *Water Environment Research*. 75(6). 539-548.
- Müller J. A. (2001): Prospects and problems of sludge pretreatment processes. *Water Science and Technology*. 44(10). 121-128.
- Németh Zs. (2004): Iszapkezelés ultrahanggal. XVIII. Országos Környezetvédelmi Konferencia, Siófok (konferencia kiadvány). 83-91.
- Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (2010): Magyarország megújuló energia hasznosítási cselekvési terve a 2020-ig terjedő megújuló energiahordozó felhasználás alakulásáról. Budapest. 105. 193-194.
- Neumüller O. A. (szerk.)(1981): *Römpp Vegyészeti Lexikon. Terazólimsók szócikke*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest. 623.
- NF EN ISO 23753-1. Qualité du sol - Détermination de l'activité des déshydrogénases dans les sols - Partie 1 : méthode au chlorure de triphényltétrazolum (CTT).
- Nickel K., Neis U. (2004): Methods of disintegration of sewage sludge. Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH). Training of International Co-operation Partners. Hamburg. 1-35.
- Nielsen B. (1999): Thermophilic anaerobic digestion and pasteurisation. Practical experience from Danish Wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*. 42. 65-72.
- Nielsen B., Petersen G. (2001): Thermophilic anaerobic digestion. Experience and effect on the hygienic quality of the sludge. In: Nordic Conference on treatment of municipal wastewater. Copenhagen. January 17-19.
- Nies U., Nickel K., Tiehm A. (2000): Enhancement of anaerobic sludge digestion by ultrasonic disintegration. *Water Science and Technology*. 42(9). 73-80.
- Organic and volatile acids. Standard methods for the examination of water and wastewater (1995). 19th Edition. Publication Office American Public Health Association, 1015 Fifteenth Street, NW Washington, DC 20005.
- Országos Hulladékgazdálkodási terv (2008). Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest.

- Öllös G., Oláh J., Palkó Gy. (2010): Rothasztás. Magyar Víziközmű Szövetség, Budapest. 19-187, 598-658, 665-701, 799-822, 895-934, 1079-1090.
- Palkó Gy., Oláh, J., Szilágyi M. (2005): Az anaerob iszapkezelésben rejlő energiatermelési és – hasznosítási lehetőségek (FCSM Zrt. anyaga)
- Ramalho R.S. (1977): Introduction to wastewater treatment processes. In: Aerobic and anaerobic digestion of sludges. Academic Press. New York. 297-308.
- Rejsek K., Formanek P., Pavelka M. (2008): Estimation of protease activity in soils at low temperatures by casein amendment and with substitution of buffer by demineralized water. *Amino Acids, Biochemical and Life Sciences*. 35(2). 411-417.
- Rimkus R.R., Ryan J.M., Cook E.J. (1982): Full-scale thermophilic digestion at the West-Southwest Sewage Treatment works. Chicago. Illinois. *Journal WPCF*. 54(11). 1447-1457.
- Rivard C. J., Nieves R. A., Nagle N. J., Himmel M. E. (1994): Evaluation of discrete cellulase enzyme activities from anaerobic digester sludge fed a municipal solid waste feedstock. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 45-46(1). 453-462.
- Rödig H. (1955): Die anaerobe alkalische Schlammfäulung. gwf, Schriftenreihe Wasser, Abwasser Bd. 1. R. Oldenbourg Verlag, München und Wien.
- Sawayama S., Inoue S., Yagishita T., Ogi T., Yokoyama H. (1995): Thermochemical liquidization and anaerobic treatment of dewatered sewage sludge. *Journal of Fermentation and Bioengineering*. 79(3). 300-302.
- Scheidt B., Kasche V., Sekulov I. (1999): Primary sludge hydrolysis under addition of hydrolytic enzymes. II. International Symposium on Anaerobic Digestion of Solids Waste. Barcelona. 1999. June 15-17., 161-168.
- Schieder D., Schneider R., Bischof F. (2000): Thermal hydrolysis (TDH) as a pretreatment method for the digestion of organic waste. *Water Science and Technology*. 41(3). 181-187.
- Schroeder E. D. (1977): Water and wastewater treatment. McGraw-Hill Book Company, New York. 217-233, 262-277, 311-337.
- Siegrist H., Renggli D., Gujer W. (1993): Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. *Water Science and Technology*. 27(2). 25-36.
- Skujins J. (1976): Enzymes in soil. In: Mc Laren A.D., Peterson G.H. (eds.). *Soil Biochemistry*. Marcel Dekker. Inc. New York. USA. 371-414.
- Somosné Nagy A. (szerk.)(2010): A biogáz szerepe a vidékgazdaságban (beszámoló). Bács-Kiskun Megyei Agrárkamara. 10-11., 23-24.
- Szabó I. M. (1999): A bioszféra mikrobiológiája (I., II., III. kötet). Akadémiai Kiadó. Budapest. 1186-1890, 1279-1281, 1360-1364.
- Szennyvizek vizsgálata. A tisztított szennyvíz átlátszóságának, az üledék térfogatának és az iszap aktivitásának mérése. MSZ 260/46-81.
- Tamás J. (1998): Szennyvíztisztítás és szennyvíziszap elhelyezés (egyetemi jegyzet). Debreceni Agrártudományi Egyetem. Debrecen. 7-53., 79-102.

Tauber T., Berta B., Székely J. A., Gyarmati I., Kékesi K., Márialigeti K., M. Tóth E. (2007): Characterisation of community structure of bacteria in parallel mesophilic and thermophilic pilot scale anaerobe sludge digesters. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 54(1). 47-55.

Tchobanoglous G., Burton F. L., Stensel H. D. (2003): *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*. 4th edition. Metcalf & Eddy Inc. McGraw Hill Science. 986-996., 991-992., 1505-1533.

Tengerdy R. P., Nagy J. G., Martin B. (1967): Quantitative measurement of bacterial growth by the reduction of tetrazolium salts. *Follow Applied and Environmental Microbiology*. 15(4), 215-222.

Thiel P. G., Hattingh W. H. J. (1967): Determination of hydrolytic enzyme activities in anaerobic digesting sludge. *Water Research* 1(3). 191-196.

Thiel P. G., Toerien D. F., Hattingh W. H. J., Kotzé J. P., Siebert M. L. (1968): Interrelations between biological and chemical characteristics in anaerobic digestion. *Water Research* 2(6). 391-408.

Thiem A, Nickel K., Neis U. (1997): The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge. *Water Science and Technology*. 36(11). 219-233.

Titration Method. Standard methods for the examination of water and wastewater (1995). 19th Edition. Publication Office American Public Health Association, 1015 Fifteenth Street, NW Washington, DC 2005.

Varga E. (1999): *Környezettechnológia. A Környezettechnológia című tárgy 1998/1999. tanévi előadássorozatának szerkesztett változata* (www.chem.elte.hu).

Vermes L. (2005): *Hulladékgazdálkodás, hulladékhasznosítás. Mezőgazda Kiadó. Budapest.* 113-117., 143-151.

Vermes L. (szerk.) (1997): *Vízgazdálkodás mezőgazdasági, kertész-, tájépítész- és erdőmérnök- hallgatók részére. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. Budapest.* 350-378.

Vorderwülbecke T., Kieslich K., Erdmann H. (1992): Comparison of lipases by different assays. *Enzyme Microbiological Technology*. 14(8). 631-639.

Wellens H., Zahn R. (1971): Untersuchungen über Toxizitätsbestimmungen von Abwässern und Abwasserinhaltsstoffen nach der Dehydrogenasenaktivität (TTC-Methode). *Chemikerzeitung*. 95. 472-478.

Wellinger A. (1999): Process design of agricultural digesters. *Nova Energie GmbH. Ettenhausen*. 3-28.

Zábránská J., Dohányos M., Jenicek P., Zaplatilková P., Kutil J. (2002): The contribution of thermophilic anaerobic digestion to the stable operation of wastewater sludge treatment. *Water Science and Technology*. 46(4-5). 447-453.

Zábránská J., Dohányos M., Jenicek P., Kutil J. (2000a): Thermophilic process and enhancement of excess activated sludge degradability-two ways of intensification of sludge

treatment in the Prague central wastewater treatment plant. Water Science and Technology 41(9). 265-272.

Zábranská J., Stepova J., Wachtl R., Jenicek P., Dohányos M. (2000b): The activity of anaerobic biomass in thermophilic and mesophilic digester at different loading rates. Water Science and Technology. 42(9). 49-56.

Internetes hivatkozások:

www.biopract.de/downloads/dbg/folder_methaplustsm_bogas_en.pdf – letöltés: 2007. 02.

06. A Biopract GmbH hivatalos honlapja.

www.cowatec.com/downloads/biogas/methaplustsm.pdf – letöltés: 2007. 02. 06. A Cowatec

GmbH hivatalos honlapja.

www.mszt.hu/mszt/portal/user/anon/page/default.psm1 – letöltés: 2011. 09. 26. A Magyar

Szabványügyi Testület hivatalos honlapja.

10. Ábrajegyzék

1. *ábra:* A háromfokozatú, eleveniszapos szennyvíztisztítási technológia mechanikai fokozatának folyamatábrája (saját szerkesztés)
2. *ábra:* Dorr-típusú előüleptítő (Forrás: Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep, Budapest, Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.)
3. *ábra:* A háromfokozatú, eleveniszapos szennyvíztisztítási technológia biológiai fokozatának folyamatábrája (saját szerkesztés)
4. *ábra:* Biológiai fokozat (Forrás: Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep, Budapest, Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.)
5. *ábra:* A háromfokozatú, eleveniszapos szennyvíztisztítási technológia tercier fokozatának folyamatábrája (saját szerkesztés)
6. *ábra:* Az anaerob szervesanyag lebontás anyagcsere-folyamatai (Siegrist (1993)) alapján saját szerkesztés)
7. *ábra:* A tetrazólium sók általános szerkezeti képlete (saját szerkesztés)
8. *ábra:* Az iszapvonalai technológia folyamatábrája (saját szerkesztés)
9. *ábra:* A biogáz kezelés és hasznosítás folyamatábrája (saját szerkesztés)
10. *ábra:* Félüzemi méretű anaerob rothasztó berendezés kapcsolási vázlata (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)
11. *ábra:* A félüzemi fermentorok (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)
12. *ábra:* Mezofil hőmérsékletű üzemi fermentorok, előtérben a kéntelenítő tornyok (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)
13. *ábra:* Termofil hőmérsékletű üzemi fermentor (Forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep)
14. *ábra:* Orsat-készülék (forrás: Fővárosi Csatornázási Művek Zrt, Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep Iszapvonalai Laboratórium)
15. *ábra:* A lejátszódó redoxireakció alapja (saját szerkesztés)
16. *ábra:* A dehidrogenáz aktivitás változása az alkalmazott iszaptérfogat függvényében 37°C-on (1 h inkubálás, n=20)
17. *ábra:* A dehidrogenáz aktivitás változása a hőmérséklet függvényében 1 cm³ iszap bemérés esetén (1 h inkubálás, n=20)
18. *ábra:* A dehidrogenáz enzimaktivitás változása az inkubációs idő függvényében 1 cm³ iszaptérfogat esetén 37°C-on (n=20)
19. *ábra:* L-kazein szerkezete (saját szerkesztés)
20. *ábra:* Az L-tirozin (Tyr, T) szerkezete (saját szerkesztés)

21. *ábra:* A proteáz aktivitás változása az alkalmazott iszapterfogat függvényében 37°C-on (1 h inkubálás, n=13)
22. *ábra:* A proteáz aktivitás változása a hőmérséklet függvényében 2 cm³ iszapterfogat esetén (1 h inkubálás, n=13)
23. *ábra:* A p-nitro-fenil-palmitát szerkezete (saját szerkesztés)
24. *ábra:* A p-nitro-fenol szerkezete (saját szerkesztés)
25. *ábra:* A lipáz aktivitás változása az alkalmazott iszapvíz térfogat függvényében 45°C-on (1 h inkubálás, n=10)
26. *ábra:* A lipáz aktivitás változása hőmérséklet függvényében 1 cm³ iszapvíz térfogattal (1 h inkubálás, n=10)
27. *ábra:* A lipáz aktivitás változása inkubálási idő függvényében 1 cm³ iszapvíz térfogattal (1 h inkubálás, n=10)
28. *ábra:* A karboximetil-cellulóz (CMC) szerkezete (R = H vagy CH₂COOH, n = polimerizációfok) (saját szerkesztés)
29. *ábra:* A cellulóz szerkezete (n = polimerizációfok) (saját szerkesztés)
30. *ábra:* A glükóz szerkezete (saját szerkesztés)
31. *ábra:* A celluláz enzimaktivitások változása 4 és 24 órás inkubálási idő alatt CMC, illetve előkezelt fű szubsztrát esetén 37°C-on (n=10)
32. *ábra:* A celluláz enzimaktivitások változása a hőmérséklet függvényében 24 órás inkubálási idő alatt CMC, illetve előkezelt fű szubsztrát esetén (n=10)
33. *ábra:* Kísérleti periódusok összefoglalása
34. *ábra:* A dehidrogenáz enzimaktivitás változása a kísérleti periódus alatt félüzemi rendszerben
35. *ábra:* A proteáz enzimaktivitás változása a kísérleti periódus alatt félüzemi rendszerben
36. *ábra:* A lipáz enzimaktivitás változása a kísérleti periódus alatt félüzemi rendszerben
37. *ábra:* A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban
38. *ábra:* A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban
39. *ábra:* A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban
40. *ábra:* A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi termofil hőmérsékletű fermentorban
41. *ábra:* A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi termofil hőmérsékletű fermentorban
42. *ábra:* A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt a félüzemi termofil hőmérsékletű fermentorban
43. *ábra:* A dehidrogenáz aktivitás változása a mezofil, illetve a termofil üzemi méretű rendszerben
44. *ábra:* A proteáz aktivitás változása a mezofil, illetve a termofil üzemi méretű rendszerben
45. *ábra:* A lipáz aktivitás változása a mezofil, illetve a termofil üzemi méretű rendszerben
46. *ábra:* A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban
47. *ábra:* A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban
48. *ábra:* A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi mezofil hőmérsékletű fermentorban
49. *ábra:* A dehidrogenáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi termofil hőmérsékletű fermentorban
50. *ábra:* A proteáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi termofil hőmérsékletű fermentorban
51. *ábra:* A lipáz enzimaktivitás és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a kísérleti periódus ideje alatt az üzemi termofil hőmérsékletű fermentorban
52. *ábra:* Az átlagos gázmennyiség változása a félüzemi reaktorokban a hőmérsékletemelés hatására (a két reaktorban mért értékek átlaga)

53. *ábra*: A gázösszetétel változása az I. számú félüzemi reaktorban
 54. *ábra*: A gázösszetétel változása a II. számú félüzemi reaktorban
 55. *ábra*: A lúgosság és az illósav változása az I. számú félüzemi reaktorban
 56. *ábra*: A lúgosság és az illósav változása a II. számú félüzemi reaktorban
 57. *ábra*: A dehidrogenáz enzimaktivitás változása a félüzemi reaktorokban
 58. *ábra*: A proteáz enzimaktivitások változásai a félüzemi reaktorokban
 59. *ábra*: A lipáz enzimaktivitások változásai a félüzemi reaktorokban
 60. *ábra*: A vizsgált enzimaktivitások változása a kísérleti periódus alatt
 61. *ábra*: A proteáz aktivitás, a lipáz aktivitás, az illósav-koncentráció és a fajlagos szervesanyag terhelés változása a félüzemi, mezofil rothasztó berendezésben
 62. *ábra*: A proteáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari mezofil rothasztó toronyban
 63. *ábra*: A lipáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari mezofil rothasztó toronyban
 64. *ábra*: A proteáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari termofil rothasztó toronyban
 65. *ábra*: A lipáz aktivitás változása a fajlagos szervesanyag terhelés függvényében az ipari termofil rothasztó toronyban
 66. *ábra*: A dehidrogenáz enzimaktivitás változása a félüzemi reaktorokban a kísérleti periódus alatt
 67. *ábra*: Az átlagos dehidrogenáz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken
 68. *ábra*: Az átlagos proteáz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken
 69. *ábra*: Az átlagos lipáz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken
 70. *ábra*: Az átlagos celluláz aktivitás és szórásértékei a vizsgált hőmérsékleteken a szilárd enzimmészítmény hatására CMC, illetve fű szubsztrát esetén
 71. *ábra*: A gázmennyiség változása a kísérleti periódus alatt
 72. *ábra*: Az ellenőrző paraméterek változása a koszubsztrát fermentáló kísérleti periódus alatt
 73. *ábra*: A celluláz, a proteáz, a dehidrogenáz enzimaktivitások változása a kísérleti periódus stabil fűbetáplálási időszakában (75. – 100. nap)

11. Táblázatjegyzék

1. *táblázat*: A szennyvíziszap mezőgazdasági és hasznosítás nélküli elhelyezésének lehetőségei
2. *táblázat*: A mezofil és a termofil félüzemi rothasztók mikrobaközösségeinek *Arcaea* összetétele és jellemzésük
3. *táblázat*: A mezofil és a termofil félüzemi rothasztók mikrobaközösségeinek *Bacteria* összetétele és jellemzésük
4. *táblázat*: A mezofil és a termofil hőmérsékletű rendszerek összehasonlítása üzemelési és üzemellenőrzési paraméterek alapján
5. *táblázat*: A mezofil és a termofil rendszer előnyei
6. *táblázat*: A mezofil és a termofil rendszer hátrányai
7. *táblázat*: Különböző vegyületcsoportok elméleti biogáz potenciálja
8. *táblázat*: A biogáz kihozatal különféle hulladékokból (irodalmi adatok)
9. *táblázat*: Az anaerob lebontás folyamatában mérgező hatású komponensek listája (szakirodalmi adatok)
10. *táblázat*: Előkezelési eljárások csoportosítása
11. *táblázat*: A MethaPlus® enzimmészítmény fizikai tulajdonságai
12. *táblázat*: Az enzimaktivitás mérések vizsgálati körülményeinek összefoglalása
13. *táblázat*: A félüzemi kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=30) a mezofil, illetve a termofil hőmérsékletű reaktorban
14. *táblázat*: Az üzemellenőrzési paraméterek és az enzimaktivitások változása mezofil és a termofil rendszerben, félüzemi körülmények között a 30 napos kísérleti periódus ideje alatt (n=30)
15. *táblázat*: A félüzemi termofil hőmérsékletű rothasztás korrelációs adatai (n=30)

16. táblázat: A félüzemi mezofil hőmérsékletű rothasztás korrelációs adatai (n=30)
17. táblázat: A kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=50) az üzemi reaktorokban
18. táblázat: Az üzemellenőrzési paraméterek és az enzimaktivitások változása mezofil és a termofil rendszerben, üzemi körülmények között az 50 napos kísérleti periódus ideje alatt (n=50)
19. táblázat: A mezofil hőmérsékletű üzemi rothasztás korrelációs adatai (n=36)
20. táblázat: A termofil hőmérsékletű üzemi rothasztás korrelációs adatai (n=36)
21. táblázat: A kísérleti periódus jelzett szakaszában az üzemeltetési paraméterek átlagértékei és szórásadatai a félüzemi reaktorokban
22. táblázat: Az I. reaktor korrelációs adatai (n=91)
23. táblázat: A II. reaktor korrelációs adatai (n=91)
24. táblázat: Az üzemellenőrzési paraméterek és az enzimaktivitások változása a termofil félüzemi körülmények között a 11 napos kísérleti periódus ideje alatt
25. táblázat: A kísérleti periódus korrelációs adatai (n=11)
26. táblázat: A félüzemi kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=49) a mezofil hőmérsékletű fermentorban
27. táblázat: Az ellenőrző paraméterek és a proteáz és a lipáz aktivitása a félüzemi, mezofil rothasztó berendezésben
28. táblázat: A kísérleti periódus korrelációs adatai (n=17)
29. táblázat: A kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=28) a szervesanyag terhelés változtatása mellett üzemi körülmények között
30. táblázat: A mezofil kísérleti periódus korrelációs adatai (n=28)
31. táblázat: A termofil kísérleti periódus korrelációs adatai (n=28)
32. táblázat: A kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei (n=7) a félüzemi reaktorokban
33. táblázat: Az ellenőrző paraméterek és az iszap dehidrogenáz aktivitása a félüzemi, mezofil rothasztó berendezésben (n=7)
34. táblázat: A 0,1 g/dm³ koncentrációjú enzimmészítmény-oldatok tulajdonságai
35. táblázat: A dehidrogenáz enzimaktivitás növekedés a folyékony és a szilárd halmazállapotú enzimmészítmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)
36. táblázat: A proteáz enzimaktivitás növekedés a folyékony és a szilárd halmazállapotú enzimmészítmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)
37. táblázat: A lipáz enzimaktivitás növekedés a folyékony és a szilárd halmazállapotú enzimmészítmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)
38. táblázat: A celluláz enzimaktivitás növekedés a szilárd enzimmészítmény hatására a vizsgált hőmérsékleteken (n=12)
39. táblázat: A félüzemi kísérleti periódus alatti üzemeltetési paraméterek napi átlagértékei a kontroll időszak (n=36), illetve fűtápolási időszak (n=76) alatt a termofil hőmérsékletű fermentorban

12. Mellékletek

Melléklet 1.: Az ELTE TTK Analitikai Kémiai Tanszékének receptje

Az ELTE TTK Analitikai Kémiai Tanszékének módszere (aerob eredetű) eleveniszap dehidrogenáz aktivitásának mérését írja le. A recept a következő:

Egy kémcsőbe 1,0 cm³ eleveniszaphoz 0,3 cm³ 7,2 pH-jú foszfátpuffert, 0,6 cm³ 92 g/dm³-es nátrium-acetát, 0,15 cm³ 3,6 g/dm³-es nátrium-szulfit és 0,9 cm³ 4 g/dm³-es TTC-oldatot kell adni. Ezután homogenizálni, majd 1 órán keresztül 37°C-on kell tartani. Az inkubálást követően az enzimreakciót 2-3 csepp koncentrált kénsavat cseppentve a kémcsővekbe leállítjuk. A színyanyag extrahálásához a mintát 80-90°C-os fürdőbe helyezzük, és 2,0 cm³ butanolt mérünk hozzá. Jól összerázza extraháljuk a színyanyagot,

majd a minta lehülése után a butanolos fázist egy másik tiszta kémcsőbe átöntjük. Ezután az extrakciót megismételjük 2 cm³ butanollal mindaddig, míg színanyagot nyerhetünk ki a vizes fázisból. Az összesített és szükség esetén a lebegőanyagtól szűrőssel megtisztított butanolos fázis színnyelését 485 nm-en spektrofotométerrel 1 cm-es kivetta alkalmazásával meghatározzuk.

Melléklet 2.: Szennyvízzel, szennyvíziszappal kezelt mezőgazdaságilag hasznosított területek talajvizsgálata, Talajbiológiai aktivitás vizsgálat dehidrogenáz enzimaktivitási módszerrel című MSZ-08-1721/3-86 számú magyar szabvány

A recept szerint 3 g eredeti nedvességű, (mészköpporral) előkezelt talajmintához 1 cm³ 3 m/m% TTC-oldatot és 2,5 cm³ desztillált vizet adunk. Összekeverés után a három párhuzamos mintát, valamint a vakmintát is 24 órán keresztül 37°C-on inkubáljuk. Az inkubációs idő leteltével a szuszpenziót előnedvesített szűrőpapíron keresztül metanollal átmossuk. Metanollal több részletben mossuk a szűrőn maradt szuszpenziót 50 cm³-es végtérfogatig. A minták trifetil-formazán tartalmát 485 nm-en metanollal szemben spektrofotométerrel mérjük.

Melléklet 3.: A rothasztó tornyok ellenőrzése szennyvíziszap dehidrogenáz aktivitásának meghatározásával (kidolgozott módszer)

Szükséges anyagok, eszközök: 1 m/m% 2,3,5-trifenil-tetrazólium-klorid-oldat (TTC szubsztrát), trifetil-formazán (TF)(kalibrációhoz), telített NaHCO₃-oldat (puffer), abszolút etanol, MACHEREY-NAGEL MN 619 G1/4 típusú, 11 cm átmérőjű szűrőpapír, 25 cm³-es mérőlombikok, pipetták, spektrofotométer küvetákkal.

A meghatározás menete:

1 cm³ rothasztott iszapmintát bemérünk egy 25 cm³-es, szélesnyakú mérőlombikba úgy, hogy az iszap a lombik aljára kerüljön és ne kenődjön a lombik falára. Hozzáadunk 1 csepp telített NaHCO₃-ot, mint puffert és 1 cm³ 1 m/m%-os TTC-oldatot, mint szubsztrátot. A minta mellett vakmintát is készítünk. A vakminta készítésekor 1 cm³ rothasztott iszapot az előzőekben leírttal megegyező módon bemérünk, hozzáadunk 1 csepp telített NaHCO₃-ot, de nem adunk hozzá TTC-t. A mintákat 37°C-on 1 órán át inkubáljuk.

A reakciót abszolút etanollal állítjuk le úgy, hogy a lombikot jelig töltjük. A vakminta esetében a jelig töltés előtt a lombikba adunk 1 cm³ 1 m/m%-os TTC-t és csak ezután töltjük fel a lombikot. Ezután a mérőlombikokat üvegdugóval lezárva többször jó alaposan összezázzuk és hagyjuk ülepedni 10 percig. A felülúszóból szűrőpapíron átszűrünk kb. 10 cm³-t, és 485 nm-en mérjük az oldat abszorbanciáját etanollal szemben.

A kalibráló sorozat tagjait ugyancsak 485 nm-en mérjük, szintén etanolt használva vakként. A felvett tartományt az iszapra jellemző enzimaktivitásnak megfelelően választjuk ki. A grafikusán készített kalibrációs görbe segítségével állapítjuk meg az iszaphól extrahált trifetil-formazán koncentrációját mg/dm³-ben.

A számoláshoz szükséges a rothasztott iszap szárazanyag- és szervesanyag-tartalmának vizsgálata is. Az aktuális dehidrogenáz enzimaktivitást mg TF / g szervesa. *h mértékegységben adjuk meg.

Melléklet 4.: A dehidrogenáz enzimaktivitás módszer adaptálása céljából végzett vizsgálatok eredményei

Az iszaptérfogat változtatása:

Iszapinta dehidrogenáz aktivitása (bemért iszap = 0,5 cm ³) 37°C-on, 1 h inkubálási idővel (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)										
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia					mg TF /cm ³ iszap *h	mg TF /g száraz. *h	mg TF /g szervesa. *h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	30,5	15,5	0,236	0,261	0,204	0,234	0,048	0,32	10,3	20,4
2	57,5	33,5	0,348	0,316	0,309	0,324	0,064	0,44	7,7	13,2
3	52,5	30,5	0,138	0,150	0,216	0,168	0,055	0,19	3,7	6,3
4	57,5	33,5	0,340	0,236	0,243	0,273	0,054	0,37	6,5	11,1
5	57,5	33,5	0,259	0,255	0,264	0,259	0,077	0,31	5,4	9,3
6	35,0	20,5	0,315	0,327	0,356	0,333	0,105	0,39	11,1	18,9
7	40,0	23,0	0,374	0,562	0,521	0,486	0,052	0,74	18,4	32,1
8	40,0	23,0	0,474	0,452	0,410	0,445	0,057	0,66	16,5	28,7
9	36,0	22,5	0,548	0,587	0,521	0,552	0,074	0,81	22,6	36,1
10	36,0	22,5	0,436	0,397	0,345	0,393	0,080	0,53	14,8	23,6
11	39,4	19,9	0,452	0,439	0,433	0,441	0,116	0,55	14,0	27,8
12	36,0	20,0	0,421	0,439	0,399	0,420	0,096	0,55	15,3	27,5
13	38,0	23,0	0,140	0,135	0,157	0,144	0,090	0,09	2,4	4,0
14	38,8	20,2	0,123	0,103	0,101	0,109	0,032	0,13	3,4	6,5
15	40,2	28,5	0,363	0,285	0,326	0,325	0,073	0,43	10,6	15,0
16	36,5	21,5	0,668	0,672	0,625	0,655	0,136	0,88	24,2	41,0
17	35,5	20,5	0,655	0,598	0,612	0,622	0,080	0,92	25,9	44,9
18	48,5	29,5	0,587	0,568	0,678	0,611	0,120	0,83	17,2	28,5
19	46,5	26,5	0,687	0,699	0,745	0,710	0,258	0,77	16,5	29,0
20	42,5	24,5	0,435	0,415	0,399	0,416	0,198	0,37	8,7	15,1
átlag	42,2	24,6	0,400	0,395	0,393	0,396	0,093	0,51	12,8	21,9
szórás	8,3	5,2	0,172	0,179	0,178	0,174	0,054	0,25	7,0	11,8
RSD%	19,6	21,3	43,0	45,4	45,3	43,9	57,9	49,1	54,5	54,0

Iszapinta dehidrogenáz aktivitása (bemért iszap = 1,0 cm ³) 37°C-on, 1 h inkubálási idővel (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)										
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia					mg TF /cm ³ iszap *h	mg TF /g száraz. *h	mg TF /g szervesa. *h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	30,5	15,5	0,643	0,627	0,521	0,597	0,065	0,45	14,8	29,2
2	37,5	20,5	0,933	0,842	0,818	0,864	0,114	0,64	11,1	19,0
3	52,5	30,5	0,852	0,810	0,879	0,847	0,101	0,63	12,1	20,8
4	57,5	33,5	0,539	0,611	0,558	0,569	0,088	0,41	7,1	12,2
5	57,5	33,5	0,989	0,974	0,969	0,977	0,073	0,38	6,7	11,5
6	35,0	20,5	0,933	0,759	0,836	0,843	0,075	0,65	18,6	31,8
7	35,0	20,5	1,250	1,298	1,236	1,261	0,121	0,97	27,7	47,3
8	57,5	33,5	1,372	1,427	1,464	1,421	0,122	1,10	19,2	33,0
9	40,0	23,0	1,395	1,368	1,348	1,370	0,167	1,02	25,6	44,5
10	40,0	23,0	1,374	1,389	1,344	1,369	0,118	1,06	26,6	46,2
11	36,0	22,5	1,357	1,368	1,388	1,371	0,119	1,06	29,6	47,3
12	36,0	22,5	1,551	1,402	1,236	1,396	0,627	0,65	18,2	29,1
13	39,4	19,9	1,077	1,188	1,265	1,177	0,121	0,90	22,8	45,1
14	36,0	20,0	0,902	0,989	1,062	0,984	0,113	0,74	20,6	37,0
15	38,0	23,0	0,456	0,412	0,417	0,428	0,041	0,33	8,7	14,3
16	36,5	25,5	0,465	0,521	0,495	0,494	0,021	0,40	11,0	15,8
17	36,5	25,5	0,962	0,673	0,919	0,851	0,083	0,65	17,9	25,6
18	38,5	26,0	0,800	1,010	1,410	1,073	0,123	0,81	21,0	31,1
19	38,5	28,5	0,840	0,561	1,010	0,804	0,132	0,57	14,8	20,0
20	36,5	28,5	0,791	0,711	0,736	0,746	0,056	0,59	16,1	20,6
átlag	42,3	26,0	0,991	0,964	1,021	0,992	0,127	0,71	17,6	29,1
szórás	9,0	5,4	0,324	0,341	0,335	0,321	0,123	0,25	6,8	12,3
RSD%	21,4	20,7	32,7	35,3	32,8	32,4	97,1	34,8	38,6	42,3

Izspiminta dehidrogénáz aktivitása (bemért izsap = 2,0 cm ³) 37°C-on, 1 h inkubálási idővel (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)										
Mintaszám	Száranyanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia					mg TF /cm ³ izsap, °h	mg TF /g száraz, °h	mg TF /g szervcs, °h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	30,5	15,5	2,025	1,783	1,867	1,892	0,097	0,76	25,0	49,2
2	57,5	33,5	2,213	2,034	2,125	2,124	0,255	0,79	13,8	23,7
3	52,2	30,5	1,446	1,614	1,464	1,508	0,358	0,49	9,4	16,0
4	57,5	33,5	1,769	1,611	1,692	1,691	0,330	0,58	10,1	17,3
5	35,0	20,5	1,815	1,818	2,458	2,030	0,634	0,30	8,5	14,5
6	35,0	20,5	2,695	2,493	2,595	2,594	0,964	0,69	19,8	33,8
7	40,0	23,0	1,965	1,930	1,988	1,961	0,759	0,51	12,8	22,2
8	40,0	23,0	2,184	2,627	2,525	2,445	0,641	0,77	19,2	33,3
9	36,0	22,5	1,302	1,372	1,546	1,407	0,753	0,28	7,7	12,3
10	36,0	22,5	2,503	2,675	2,347	2,508	0,456	0,87	24,2	38,8
11	39,4	19,9	2,728	2,610	2,624	2,654	0,231	1,03	26,1	51,7
12	36,0	20,0	1,278	1,246	1,253	1,259	0,111	0,49	13,6	24,4
13	38,0	23,0	0,886	0,814	1,041	0,914	0,144	0,33	8,6	14,2
14	38,8	20,2	1,128	0,933	0,979	1,013	0,029	0,42	10,8	20,7
15	40,2	28,8	1,981	1,798	1,888	1,889	0,278	0,68	17,0	23,8
16	36,5	21,5	1,390	1,604	1,767	1,587	0,070	0,64	17,7	30,0
17	48,5	29,5	1,997	2,099	2,676	2,257	0,266	0,85	17,4	28,7
18	46,5	26,5	1,586	1,588	1,710	1,628	0,042	0,67	14,5	25,4
19	42,5	24,5	1,897	1,995	2,015	1,969	0,258	0,73	17,1	29,7
20	36,5	26,5	1,755	1,699	1,890	1,781	0,214	0,67	18,2	25,1
átlag	41,1	24,3	1,827	1,817	1,923	1,856	0,345	0,63	15,6	26,7
szórás	7,5	4,8	0,501	0,521	0,513	0,496	0,270	0,20	5,6	10,7
RSD%	18,3	19,9	27,4	28,7	26,7	26,7	78,4	32,2	35,9	40,2

A hőmérséklet változtatása:

Dehidrogénáz aktivitás hőmérséklet függése, 20°C , 1 h inkubálási idő (1 cm ³ mezofil hőmérsékletű rothasztóból származó izszipminta)										
Mintaszám	Száranyanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia					mg TF /cm ³ izsap *h	mg TF /g száranyanyag *h	mg TF /g szervesanyag *h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	45,0	28,0	0,900	0,948	0,979	0,942	0,075	0,43	9,6	15,5
2	45,0	29,0	1,294	1,254	1,214	1,254	0,076	0,59	13,1	20,3
3	38,0	19,0	0,964	1,062	1,130	1,052	0,069	0,49	12,9	25,9
4	28,0	18,0	1,030	1,362	1,444	1,279	0,096	0,59	21,1	32,9
5	24,5	16,5	1,134	1,138	1,374	1,215	0,094	0,56	22,9	34,0
6	26,0	18,0	1,325	1,310	1,420	1,352	0,113	0,62	23,8	34,4
7	35,5	20,5	0,892	0,795	1,066	0,918	0,092	0,41	11,6	20,1
8	43,0	23,0	0,815	0,975	1,182	0,991	0,125	0,43	10,1	18,8
9	36,5	23,5	0,854	0,895	0,940	0,896	0,052	0,42	11,6	18,0
10	39,0	23,5	0,528	0,742	0,767	0,679	0,054	0,31	8,0	13,3
átlag	36,1	21,9	0,974	1,048	1,152	1,058	0,085	0,49	14,5	23,3
Szórás	7,6	4,3	0,237	0,215	0,222	0,212	0,024	0,10	5,8	7,9
RSD%	21,1	19,5	24,3	20,5	19,2	20,1	28,2	20,6	40,4	34,0

Dehidrogénáz aktivitás hőmérséklet függése, 37°C, 1 h inkubálási idő (1 cm ³ mezofil hőmérsékletű rothasztóból származó izspiminta)										
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia					mg TF /cm ³ izsap *h	mg TF /g száranyag *h	mg TF /g szervesanyag *h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	45,0	28,0	1,356	1,875	1,866	1,699	0,105	0,80	17,7	28,5
2	45,0	29,0	1,437	1,357	1,648	1,481	0,089	0,70	15,5	24,0
3	38,0	19,0	1,274	1,020	1,408	1,234	0,091	0,57	15,0	30,1
4	28,0	18,0	0,929	1,078	1,138	1,048	0,061	0,49	17,6	27,4
5	24,5	16,5	1,400	1,302	1,422	1,375	0,059	0,66	26,9	39,9
6	26,0	18,0	0,898	1,024	1,120	1,014	0,067	0,47	18,2	26,3
7	35,5	20,5	1,162	1,210	0,924	1,099	0,069	0,51	14,5	25,1
8	43,0	23,0	0,864	0,990	1,092	0,982	0,149	0,42	9,7	18,1
9	36,5	23,5	0,770	1,005	0,992	0,922	0,110	0,41	11,1	17,3
10	39,0	23,5	0,914	0,830	1,004	0,916	0,087	0,41	10,6	17,6
átlag	36,1	21,9	1,100	1,169	1,261	1,177	0,089	0,54	15,7	25,4
Szórás	7,6	4,3	0,252	0,294	0,312	0,264	0,028	0,13	5,0	6,9
RSD%	21,1	19,5	22,9	25,2	24,8	22,4	31,2	24,6	31,7	27,1

Dehidrogenáz aktivitás hőmérséklet függése, 45°C, 1 h inkubálási idő (1 cm ³ mezofil hőmérsékletű rothasztóból származó iszapmintá)										
Mintaszám	Száranyagyan (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbanca					mg TF /cm ³ iszap /h	mg TF /g száranyagyan /h	mg TF /g szervesanyagyan /h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	45,0	28,0	0,736	0,728	0,671	0,712	0,035	0,34	7,5	12,1
2	45,0	29,0	0,388	0,369	0,375	0,377	0,028	0,17	3,9	6,0
3	38,0	19,0	0,651	0,677	0,830	0,719	0,039	0,34	9,0	17,9
4	28,0	18,0	0,702	0,713	0,654	0,690	0,023	0,33	11,9	18,5
5	24,5	16,5	0,518	0,494	0,532	0,515	0,039	0,24	9,7	14,4
6	26,0	18,0	0,516	0,537	0,494	0,516	0,029	0,24	9,4	13,5
7	35,5	20,5	0,495	0,465	0,526	0,495	0,029	0,23	6,6	11,4
8	43,0	23,0	0,447	0,487	0,580	0,505	0,030	0,24	5,5	10,3
9	36,5	23,5	0,635	0,585	0,571	0,597	0,044	0,28	7,6	11,8
10	39,0	23,5	0,672	0,641	0,681	0,665	0,036	0,31	8,1	13,4
átlag	36,1	21,9	0,576	0,570	0,591	0,579	0,033	0,27	7,9	12,9
Szórás	7,6	4,3	0,118	0,119	0,125	0,115	0,006	0,06	2,3	3,6
RSD%	21,1	19,5	20,5	20,9	21,1	19,8	19,4	20,7	28,7	28,0

Dehidrogenáz aktivitás hőmérséklet függése, 55°C, 1 h inkubálási idő (1 cm ³ mezofil hőmérsékletű rothasztóból származó iszapminta)										
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbanca					mg TF /cm ³ iszap *h	mg TF /g száranyag *h	mg TF /g szervesanyag *h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	45,0	28,0	0,852	0,809	0,836	0,832	0,040	0,40	8,8	14,1
2	45,0	29,0	0,645	0,480	0,450	0,525	0,045	0,24	5,3	8,3
3	38,0	19,0	0,548	0,572	0,574	0,565	0,045	0,26	6,8	13,7
4	28,0	18,0	0,525	0,547	0,426	0,499	0,040	0,23	8,2	12,8
5	24,5	16,5	0,438	0,378	0,416	0,411	0,050	0,18	7,4	10,9
6	26,0	18,0	0,578	0,592	0,547	0,572	0,043	0,26	10,2	14,7
7	35,5	20,5	0,355	0,454	0,561	0,457	0,033	0,21	6,0	10,3
8	43,0	23,0	0,425	0,410	0,399	0,411	0,045	0,18	4,3	8,0
9	36,5	23,5	0,556	0,543	0,521	0,540	0,058	0,24	6,6	10,3
10	39,0	23,5	0,530	0,440	0,426	0,465	0,046	0,21	5,4	8,9
átlag	36,1	21,9	0,545	0,523	0,516	0,528	0,045	0,24	6,9	11,2
Szórás	7,6	4,3	0,137	0,123	0,130	0,122	0,007	0,06	1,8	2,5
RSD %	21,1	19,5	25,1	23,6	25,3	23,1	14,8	25,4	26,0	22,2

Az inkubálási idő vizsgálata:

Dehidrogenáz aktivitás - 1 h inkubálás, 37°C, 1 cm ³ iszapmintá mezofil hőmérsékletű rothasztóból										
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbanca					mg TF / cm ³ iszap *h	mg TF /g száranyag *h	mg TF /g szervesanyag *h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	32,0	24,0	0,346	0,382	0,376	0,368	0,044	0,16	5,1	6,8
2	37,5	19,5	0,661	0,620	0,670	0,650	0,052	0,30	8,0	15,3
3	34,5	19,5	0,539	0,535	0,577	0,550	0,032	0,26	7,5	13,3
4	30,5	17,0	0,617	0,777	0,800	0,731	0,042	0,34	11,3	20,3
5	34,0	17,5	0,487	0,487	0,493	0,489	0,037	0,23	6,6	12,9
6	35,5	19,0	0,631	0,598	0,607	0,612	0,070	0,27	7,6	14,3
7	33,5	18,5	0,648	0,589	0,607	0,615	0,041	0,29	8,6	15,5
8	41,0	21,0	0,802	0,550	0,668	0,673	0,057	0,31	7,5	14,7
9	31,0	17,0	0,554	0,424	0,465	0,481	0,033	0,22	7,2	13,2
10	28,5	16,5	0,327	0,353	0,249	0,310	0,048	0,13	4,6	7,9
11	29,5	17,0	0,589	0,479	0,527	0,532	0,057	0,24	8,0	14,0
12	27,0	15,5	0,460	0,410	0,330	0,400	0,047	0,18	6,5	11,4
átlag	32,9	18,5	0,555	0,517	0,531	0,534	0,047	0,24	7,4	13,3
szórás	4,0	2,3	0,135	0,120	0,158	0,130	0,011	0,06	1,7	3,5
RSD %	12,1	12,6	24,4	23,2	29,7	24,3	23,7	26,2	23,1	26,5

Dehidrogenáz aktivitás - 2 h inkubálás, 37°C, 1 cm ³ iszapmintá mezoofil hőmérsékletű rothasztóból										
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia					mg TF /cm ³ iszap %h	mg TF /g szárazanyag %h	mg TF /g szervesanyag %h
			Párhuzamosok			átlag	vak			
			1	2	3					
1	32,0	24,0	0,566	0,579	0,560	0,568	0,044	0,26	8,2	10,9
2	37,5	19,5	0,899	0,914	0,921	0,911	0,052	0,43	11,5	22,0
3	34,5	19,5	0,978	0,958	0,996	0,977	0,032	0,47	13,7	24,2
4	30,5	17,0	0,962	0,870	0,856	0,896	0,098	0,40	13,1	23,5
5	34,0	17,5	0,982	0,878	0,882	0,914	0,037	0,44	12,9	25,1
6	35,5	19,0	1,058	0,978	0,969	1,002	0,070	0,47	13,1	24,5
7	33,5	18,5	1,065	1,023	1,096	1,061	0,041	0,51	15,2	27,6
8	41,0	21,0	1,152	1,178	1,114	1,148	0,057	0,55	13,3	26,0
9	31,0	17,0	1,089	0,896	0,927	0,971	0,033	0,47	15,1	27,6
10	28,5	16,5	0,712	0,678	0,698	0,696	0,048	0,32	11,4	19,6
11	29,5	17,0	1,098	0,974	0,982	1,018	0,057	0,48	16,3	28,3
12	27,0	15,5	0,912	0,925	0,874	0,904	0,047	0,43	15,9	27,6
átlag	32,9	18,5	0,956	0,904	0,906	0,922	0,051	0,44	13,3	23,9
szórás	4,0	2,3	0,170	0,154	0,155	0,156	0,018	0,08	2,3	4,8
RSD%	12,1	12,6	17,7	17,1	17,1	17,0	35,7	17,9	17,0	20,2

Melléklet 5.: A rothasztó tornyok ellenőrzése szennyvíziszap proteáz aktivitásának meghatározásával

Szükséges anyagok, eszközök: 0,25 m/m%-os kazein-oldat (szubsztrát), tirozin (kalibráláshoz), 0,1 mol/dm³ nátrium-hidroxid, 1,0 mol/dm³ nátrium-hidroxid, 0,1 mol/dm³ kálium-hidrogén-foszfát, 15 m/m%-os triklórecetsav, Folin-reagens (1:1 arányban desztillált vízzel hígított), kémcsövek, mérőhengerek, pipetták, főzőpoharak, mérőlombikok, Macherey-Nagel MN 640-es szűrőpapír, spektrofotométer küvetákkal, mágneses keverő, Vortex keverő, pH-mérő, elektromos melegítő.

Kazein szubsztrát elkészítése: 100 cm³-es főzőpohárba bemérünk 0,25 g kazeint és hozzámérünk 43,0 cm³ 0,1 mol/dm³ NaOH-ot. Addig forraljuk, amíg a kazein maradéktalanul feloldódik. Lehűtve hozzáadunk 50 cm³ 0,1 mol/dm³ kálium-hidrogén-foszfát oldatot és mágneses keverőn kevertetve a pH-ját 7,6-ra beállítjuk. Az oldatot átöblítjük egy 100 cm³-es mérőlombikba és desztillált vízzel jelig töltjük.

A meghatározás menete:

A proteáz enzimaktivitás meghatározásához csavaros kémcsőbe 2 cm³ mintát, 2 cm³ kazein szubsztrátot és 2 cm³ desztillált vizet mérünk. 1 óra 37 °C hőmérsékleten történt inkubálás után a reakciót 3 cm³ 15 m/m%-os triklórecetsav hozzáadásával leállítjuk. A keveréket 10 percig állni hagyjuk szobahőmérsékleten, majd Macherey-Nagel MN 640-es szűrőpapíron átszűrjük. A szűrlet 2 cm³-éhez adunk 3 cm³ 1,0 mol/dm³ nátrium-hidroxidot. A keletkező vas csapadék miatt újra leszűrjük a mintát, majd 1:1 arányban a szűrlethez adunk hígított Folin-reagenst. A kialakuló kék szín intenzitását 660 nm-en mérjük a vakmintával szemben. A vakmintaként a fenti arányokban kezelt anaerob iszap aktivitását mérjük azonnali triklórecetsavas kezelést követően. Az aktivitást kalibráció készítését követően egységnyi szerves iszap által időegység alatt termelt tirozinban fejezzük ki.

Melléklet 6.: A proteáz enzimaktivitás módszer adaptálása céljából végzett vizsgálatok eredményei

Az iszapterfogat változtatása:

Iszapminta proteáz aktivitása (bemért iszap = 0,5 cm ³) 37°C-on, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbania	mg tirozin /cm ³ iszap *h	mg tirozin /g száraza. *h	mg tirozin /g szervesa. *h
1	36,0	25,5	0,071	10,79	299,7	423,1
2	36,0	25,5	0,140	21,27	591,0	834,3
3	36,0	25,5	0,163	24,77	688,1	971,4
4	36,0	25,5	0,058	8,81	244,8	345,6
5	36,0	25,5	0,049	7,45	206,8	292,0
6	36,0	25,5	0,054	8,21	227,9	321,8
7	38,0	28,5	0,026	3,95	104,0	138,6
8	38,0	28,5	0,063	9,57	251,9	335,9
9	38,0	23,0	0,225	34,19	899,8	1486,6
10	38,0	23,0	0,171	25,99	683,8	1129,8
11	35,5	26,5	0,214	32,52	916,1	1227,2
12	35,5	26,5	0,235	35,71	1006,0	1347,6
13	35,5	26,5	0,202	30,70	864,7	1158,4
átlag	36,5	25,8	0,129	19,53	537,3	770,2
szórás	1,1	1,6	0,077	11,73	324,7	474,2
RSD%	2,9	6,4	60,0	60,0	60,4	61,6

Iszapminta proteáz aktivitása (bemért iszap = 1,0 cm ³) 37°C-on, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbania	mg tirozin /cm ³ iszap *h	mg tirozin /g száraza. *h	mg tirozin /g szervesa. *h
1	57,5	33,5	0,076	5,77	100,4	172,4
2	35,0	20,5	0,161	12,23	349,5	596,7
3	35,0	20,5	0,071	5,39	154,1	263,2
4	35,0	20,5	0,109	8,28	236,6	404,0
5	40,0	23,0	0,349	26,52	662,9	1152,9
6	40,0	23,0	0,270	20,52	512,9	892,0
7	40,0	23,0	0,428	32,52	813,0	1413,9
8	40,0	23,0	0,146	11,09	277,3	482,3
9	40,0	23,0	0,139	10,56	264,0	459,2
10	40,0	23,0	0,222	16,87	421,7	733,4
11	36,0	25,5	0,130	9,88	274,4	387,4
12	36,0	25,5	0,034	2,58	71,8	101,3
13	36,0	25,5	0,102	7,75	215,3	303,9
átlag	39,3	23,8	0,172	13,07	334,9	566,4
szórás	5,9	3,4	0,115	8,77	217,7	388,0
RSD%	15,1	14,3	67,1	67,1	65,0	68,5

Iszapminta proteáz aktivitása (bemért iszap = 2,0 cm ³ 37°C-on, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból))						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	mg tirozín /cm ³ iszap *h	mg tirozín /g száraz. *h	mg tirozín /g szerves. *h
1	57,5	33,5	0,107	4,07	70,7	121,3
2	35,0	20,5	0,089	3,38	96,6	164,9
3	35,0	20,5	0,090	3,42	97,7	166,8
4	35,0	20,5	0,189	7,18	205,2	350,3
5	40,0	23,0	0,214	8,13	203,3	353,5
6	40,0	23,0	0,428	16,26	406,5	707,0
7	40,0	23,0	0,213	8,09	202,3	351,8
8	40,0	23,0	0,150	5,70	142,5	247,8
9	40,0	23,0	0,114	4,33	108,3	188,3
10	40,0	23,0	0,298	11,32	283,0	444,0
11	36,0	25,5	0,132	5,01	139,3	196,7
12	36,0	25,5	0,072	2,74	76,0	107,3
13	36,0	25,5	0,130	4,94	137,2	193,7
átlag	39,3	23,8	0,171	6,51	166,8	276,4
szórás	5,9	3,4	0,100	3,80	94,8	165,7
RSD%	15,1	14,3	58,4	58,4	56,8	59,9

Iszapminta proteáz aktivitása (bemért iszap = 4,0 cm ³ 37°C-on, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból))						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	mg tirozín /cm ³ iszap *h	mg tirozín /g száraz. *h	mg tirozín /g szerves. *h
1	35,0	20,5	0,054	1,03	29,3	50,0
2	35,0	20,5	0,030	0,57	16,3	27,8
3	35,0	20,5	0,097	1,84	52,6	89,9
4	40,0	23,0	0,185	3,51	87,9	152,8
5	40,0	23,0	0,355	6,74	168,6	293,2
6	40,0	23,0	0,191	3,63	90,7	157,7
7	40,0	23,0	0,198	3,76	94,0	163,5
8	40,0	23,0	0,252	4,79	119,7	208,1
9	36,0	25,5	0,048	0,91	25,3	35,8
10	36,0	25,5	0,050	0,95	26,4	37,2
11	36,0	25,5	0,038	0,72	20,1	28,3
12	36,0	25,5	0,137	2,60	72,3	102,1
13	42,5	30,5	0,598	11,36	267,3	372,4
átlag	37,8	23,8	0,172	3,26	82,3	132,2
szórás	2,6	2,8	0,161	3,06	71,7	108,4
RSD%	6,9	11,7	93,8	93,8	87,1	82,0

A hőmérséklet változtatása:

Proteáz aktivitás hőmérséklet függése, 20°C, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	mg tirozin /cm ³ iszap *h	mg tirozin /g száraz. *h	mg tirozin /g szervesa. *h
1	28,0	17,5	0,080	2,92	104,3	166,8
2	32,5	20,5	0,106	3,87	119,0	188,7
3	31,5	18,0	0,102	3,72	118,2	206,8
4	34,5	19,5	0,098	3,58	103,7	183,4
5	34,0	23,5	0,070	2,55	75,1	108,7
6	35,5	21,0	0,076	2,77	78,1	132,1
7	32,5	17,5	0,038	1,39	42,7	79,2
8	35,0	19,5	0,057	2,08	59,4	106,7
9	35,5	16,0	0,024	0,88	24,7	54,7
10	33,0	19,5	0,102	2,48	75,2	127,3
átlag	33,2	19,3	0,075	2,62	80,0	135,4
szórás	2,3	2,1	0,028	0,98	31,7	50,0
RSD%	6,9	11,1	37,8	37,4	39,6	36,9

Proteáz aktivitás hőmérséklet függése, 37°C, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	mg tirozin /cm ³ iszap *h	mg tirozin /g száraz. *h	mg tirozin /g szervesa. *h
1	28,0	17,5	0,098	3,58	127,7	204,4
0	32,5	20,5	0,120	4,38	134,8	213,6
3	31,5	18,0	0,124	4,53	143,7	251,4
4	34,5	19,5	0,109	3,98	115,3	204,0
5	34,0	23,5	0,098	3,58	105,2	152,2
6	35,5	21,0	0,114	4,16	117,2	198,1
7	32,5	17,5	0,076	2,77	85,3	158,5
8	35,0	19,5	0,096	3,50	100,1	179,7
9	35,5	16,0	0,069	2,52	70,9	157,4
10	33,0	19,5	0,129	3,14	95,1	161,0
átlag	33,2	19,3	0,103	3,61	109,5	188,0
szórás	2,3	2,1	0,020	0,67	22,6	32,0
RSD%	6,9	11,1	19,2	18,4	20,7	17,0

Proteáz aktivitás hőmérséklet függése, 45°C, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	mg tirozin /cm ³ iszap *h	mg tirozin /g száraz. *h	mg tirozin /g szervesa. *h
1	28,0	17,5	0,065	2,37	84,7	135,6
0	32,5	20,5	0,079	2,88	88,7	140,6
3	31,5	18,0	0,092	3,36	106,6	186,5
4	34,5	19,5	0,084	3,07	88,9	157,2
5	34,0	23,5	0,065	2,37	69,8	100,9
6	35,5	21,0	0,055	2,01	56,5	95,6
7	32,5	17,5	0,025	0,91	28,1	52,1
8	35,0	19,5	0,037	1,35	38,6	69,2
9	35,5	16,0	0,020	0,73	20,6	45,6
10	33,0	19,5	0,026	0,63	19,2	32,4
átlag	33,2	19,3	0,055	1,97	60,2	101,6
szórás	2,3	2,1	0,026	1,01	32,1	52,1
RSD%	6,9	11,1	48,2	51,1	53,3	51,3

Proteáz aktivitás hőmérséklet függése, 55°C, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)						
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	mg tirozin /cm ³ iszap *h	mg tirozin /g száraz. *h	mg tirozin /g szervesa. *h
1	28,0	17,5	0,055	2,01	71,7	114,7
0	32,5	20,5	0,045	1,64	50,5	80,1
3	31,5	18,0	0,074	2,70	85,7	150,0
4	34,5	19,5	0,069	2,52	73,0	129,1
5	34,0	23,5	0,049	1,79	52,6	76,1
6	35,5	21,0	0,047	1,72	48,3	81,7
7	32,5	17,5	0,032	1,17	35,9	66,7
8	35,0	19,5	0,025	0,91	26,1	46,8
9	35,5	16,0	0,022	0,80	22,6	50,2
10	33,0	19,5	0,040	0,97	29,5	49,9
átlag	33,2	19,3	0,046	1,62	49,6	84,5
szórás	2,3	2,1	0,017	0,66	21,7	35,6
RSD%	6,9	11,1	37,5	40,8	43,7	42,1

A Folin-reakció időfüggése:

Abszorbancia változása az idő függvényében							
Minta	5 perc	10 perc	15 perc	20 perc	30 perc	35 perc	40 perc
vak	0,621	0,641	0,648	0,643	0,641	0,639	0,642
1	0,793	0,792	0,802	0,798	0,790	0,785	0,783
2	0,699	0,711	0,714	0,706	0,700	0,695	0,693
3	0,770	0,772	0,774	0,771	0,771	0,763	0,759
Átlag	0,754	0,758	0,763	0,758	0,754	0,748	0,745
Szórás	0,049	0,042	0,045	0,047	0,047	0,047	0,047
RSD%	6,499	5,564	5,890	6,236	6,294	6,275	6,256

Melléklet 7.: A rothasztó tornyok ellenőrzése szennyvíziszap lipáz aktivitásának meghatározásával

Szükséges anyagok, eszközök: 400 cm³-es főzőpohár, 250 cm³-es mérőhenger, üvegpipetták, csavaros kémcső, centrifuga, termosztát, spektrofotométer küvetákkal, mágneses keverő, Vortex, pH-mérő, hűtőgép, n-propanol, para-nitro-fenil-palmitát, 0,05 mol/dm³ TRIS-HCl (TRIS), Triton-X, gumiarábikum

Reagens oldatok elkészítése:

I. oldat: Zárható hengerküvetánkban 10 cm³ propanolban oldjunk fel 30 mg para-nitro-fenil-palmitátot (szubsztrátot). A küvetát meleg vízbe téve segíthetjük a feloldódást. Az elkészült oldat hűtőszekrényben 1 hétig tárolható.

II. oldat: 500 cm³-es mérőlombikban 3,0285 g TRIS-HCl-ot desztillált vízben feloldunk. Kimérünk 1 g Triton-X-et, melyet egy 400 cm³-es főzőpohárba átmosunk az elkészített TRIS-HCl oldatból 225 cm³-rel. Az elkészült oldathoz hozzámérünk 0,25 g gumiarábikumot. A pH-t (szükség esetén) 8,0-ra kell beállítani 1 mol/dm³ HCl, vagy 0,1 mol/dm³ nátrium-hidroxid-oldattal. Mágneses keverővel alaposan homogenizáljuk, és csavaros kémcsövekbe 9 cm³ mennyiségeket mérünk, hűtőben tároljuk a felhasználásig.

A meghatározás menete:

15-30 perc alatt lecentrifugáljuk az iszapot. Az I. és II. oldatokat 45 °C-ra melegítjük vízfürdőben. A II. oldat 9 cm³-éhez cseppenként adjuk az I. oldat 1 cm³-ét állandó rázogatás közben, ügyelve arra, hogy ne történjen kiválás. Az emulziót 2 órán belül fel kell használni. Üres hengerküvetába

4 cm³ jól homogenizált emulziót mérünk, majd hozzáadunk 1 cm³-t a lecentrifugált iszap felülúszójából, és alaposan homogenizáljuk. 45°C-on inkubáljuk a mintákat 60 percig, majd 410 nm-en mérjük vakkal szemben a minta abszorbanciáját. 45°C-on inkubáljuk a mintákat még további 20 percig, és ismét lemérjük az abszorbanciát 410 nm-en.

Melléklet 8.: A lipáz enzimaktivitás módszer adaptálása céljából végzett vizsgálatok eredményei

Az iszapvíz térfogat változtatása:

Iszapminta lipáz aktivitása (bemért iszapvíz = 0,5 cm ³) 45°C-on, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Száranyanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia		ΔA	mg PNF/cm ³ iszap °h	mg PNF/g száraz. °h	mg PNF/g szerves. °h
			60 perc után	80 perc után				
1	29,5	15,0	0,477	0,553	0,076	0,35	11,9	23,5
2	30,5	17,0	0,562	0,617	0,055	0,26	8,4	15,0
3	33,0	15,5	0,583	0,657	0,074	0,34	10,4	22,1
4	30,5	14,0	0,511	0,566	0,055	0,26	8,4	18,2
5	30,0	15,5	0,536	0,599	0,063	0,29	9,7	18,8
6	32,0	15,5	0,551	0,622	0,071	0,33	10,3	21,2
7	34,0	16,5	0,320	0,367	0,047	0,22	6,4	13,2
8	37,0	18,0	0,315	0,375	0,060	0,28	7,5	15,5
9	30,5	18,0	0,419	0,469	0,050	0,23	7,6	12,9
10	28,5	16,0	0,262	0,272	0,010	0,05	1,6	2,9
Átlag	31,6	16,1	0,454	0,510	0,056	0,26	8,2	16,3
Szórás	2,5	1,3	0,117	0,131	0,019	0,09	2,8	6,0
RSD%	8,0	8,0	25,8	25,8	33,9	33,9	34,6	36,7

Iszapminta lipáz aktivitása (bemért iszapvíz = 1.0 cm ³) 45°C-on, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Száranyanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia		ΔA	mg PNF/cm ³ iszap °h	mg PNF/g száraz. °h	mg PNF/g szerves.
			60 perc után	80 perc után				
1	29.5	15.0	1.278	1.344	0.066	0.61	20.7	40.8
2	30.5	17.0	0.315	0.377	0.062	0.57	18.9	33.8
3	33.0	15.5	0.454	0.521	0.067	0.62	18.8	40.1
4	30.5	14.0	0.355	0.421	0.066	0.61	20.1	43.7
5	30.0	15.5	0.615	0.680	0.065	0.60	20.1	38.9
6	32.0	15.5	1.815	1.890	0.075	0.70	21.7	44.9
7	34.0	16.5	0.266	0.357	0.091	0.84	24.8	51.1
8	37.0	18.0	0.185	0.288	0.103	0.96	25.8	53.1
9	30.5	18.0	0.687	0.789	0.102	0.95	31.0	52.6
10	28.5	16.0	0.013	0.091	0.078	0.72	25.4	45.2
Átlag	31.6	16.1	0.598	0.676	0.078	0.72	22.7	44.4
Szórás	2.5	1.3	0.551	0.548	0.016	0.15	3.9	6.3
RSD%	8.0	8.0	92.1	81.1	20.2	20.2	17.3	14.3

Iszapminta lipáz aktivitása (bemért iszapvíz = 2,0 cm ³) 45°C-on, 1 h inkubálási idő (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Száranyanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia		ΔA	mg PNF/cm ³ iszap °h	mg PNF/g száraz. °h	mg PNF/g szerves. °h
			60 perc után	80 perc után				
1	29,5	15,0	0,271	0,307	0,036	0,67	22,6	44,5
2	30,5	17,0	0,443	0,485	0,042	0,78	25,5	45,8
3	33,0	15,5	0,109	0,140	0,031	0,57	17,4	37,1
4	30,5	14,0	0,617	0,652	0,035	0,65	21,3	46,4
5	30,0	15,5	0,880	0,905	0,025	0,46	15,5	29,9
6	32,0	15,5	0,652	0,674	0,022	0,41	12,8	26,3
7	34,0	16,5	0,879	0,908	0,029	0,54	15,8	32,6
8	37,0	18,0	0,676	0,700	0,024	0,45	12,0	24,7
9	30,5	18,0	0,517	0,546	0,029	0,54	17,6	29,9
10	28,5	16,0	0,495	0,552	0,057	1,06	37,1	66,1
Átlag	31,6	16,1	0,554	0,587	0,033	0,61	19,8	38,3
Szórás	2,5	1,3	0,244	0,240	0,010	0,19	7,4	12,6
RSD%	8,0	8,0	44,0	41,0	31,5	31,5	37,6	32,9

A hőmérséklet változtatása:

Lipáz aktivitás hőmérséklet függése, 20°C, 1 h inkubálási idő, 1 cm ³ iszapvíz (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervessanyag (g/kg)	Abszorbancia		AA	mg PNF/cm ² iszap *h	mg PNF/g száraz. *h	mg PNF/g szervesa. *h
			60 perc után	80 perc után				
1	33,0	15,5	0,895	0,925	0,030	0,28	8,4	17,9
2	33,0	21,0	0,561	0,623	0,062	0,57	17,4	27,4
3	35,0	18,5	0,492	0,523	0,031	0,29	8,2	15,5
4	36,5	22,0	0,596	0,662	0,066	0,61	16,8	27,8
5	33,0	19,0	0,599	0,662	0,063	0,58	17,7	30,8
6	33,0	22,5	0,633	0,705	0,072	0,67	20,2	29,7
7	33,0	19,5	0,502	0,519	0,017	0,16	4,8	8,1
8	34,0	18,5	0,587	0,624	0,037	0,34	10,1	18,5
9	33,5	20,0	0,431	0,471	0,04	0,37	11,1	18,5
10	29,5	17,5	0,443	0,456	0,013	0,12	4,1	6,9
Átlag	33,4	19,4	0,574	0,617	0,043	0,40	11,9	20,1
Szórás	1,7	2,0	0,125	0,131	0,020	0,19	5,5	8,2
RSD%	5,1	10,3	21,9	21,3	46,8	46,8	46,0	40,6

Lipáz aktivitás hőmérséklet függése, 37°C, 1 h inkubálási idő, 1 cm ³ iszapvíz (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervessanyag (g/kg)	Abszorbancia		AA	mg PNF/cm ² iszap száraz. *h	mg PNF/g szervesa. *h	mg PNF/g szervesa. *h
			60 perc után	80 perc után				
1	33,0	15,5	0,418	0,464	0,046	0,43	12,9	27,5
2	33,0	21,0	0,615	0,670	0,055	0,51	15,5	24,3
3	35,0	18,5	0,396	0,420	0,024	0,22	6,4	12,0
4	36,5	22,0	1,336	1,382	0,046	0,43	11,7	19,4
5	33,0	19,0	1,696	1,750	0,054	0,50	15,2	26,4
6	33,0	22,5	0,280	0,340	0,06	0,56	16,9	24,7
7	33,0	19,5	0,260	0,292	0,032	0,30	9,0	15,2
8	34,0	18,5	0,577	0,625	0,048	0,45	13,1	24,1
9	33,5	20,0	0,045	0,071	0,026	0,24	7,2	12,1
10	29,5	17,5	0,308	0,358	0,05	0,46	15,7	26,5
Átlag	33,4	19,4	0,593	0,637	0,044	0,41	12,3	21,2
Szórás	1,8	2,1	0,520	0,525	0,012	0,12	3,7	6,1
RSD%	5,3	10,9	87,6	82,3	28,3	28,3	30,1	28,6

Lipáz aktivitás hőmérséklet függése, 45°C, 1 h inkubálási idő, 1 cm ³ iszapvíz (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervessanyag (g/kg)	Abszorbancia		AA	mg PNF/cm ² iszap *h	mg PNF/g száraz. *h	mg PNF/g szervesa. *h
			60 perc után	80 perc után				
1	33,0	15,5	0,078	0,132	0,054	0,50	15,2	32,3
2	33,0	21,0	0,618	0,684	0,066	0,61	18,5	29,1
3	35,0	18,5	0,533	0,586	0,053	0,49	14,0	26,6
4	36,5	22,0	0,251	0,325	0,074	0,69	18,8	31,2
5	33,0	19,0	0,512	0,575	0,063	0,58	17,7	30,8
6	33,0	22,5	0,189	0,258	0,069	0,64	19,4	28,4
7	33,0	19,5	0,305	0,373	0,068	0,63	19,1	32,3
8	34,0	18,5	0,545	0,610	0,065	0,60	17,7	32,6
9	33,5	20,0	0,678	0,750	0,072	0,67	19,9	33,4
10	29,5	17,5	1,159	1,220	0,061	0,57	32,3	32,3
Átlag	33,4	19,4	0,487	0,551	0,065	0,60	19,3	30,9
Szórás	1,8	2,1	0,308	0,308	0,007	0,06	5,0	2,2
RSD%	5,3	10,9	63,4	55,9	10,8	10,8	25,7	7,1

Lipáz aktivitás hőmérséklet függése, 55°C, 1 h inkubálási idő, 1 cm ³ iszapvíz (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Száranyag (g/kg)	Szervessanyag (g/kg)	Abszorbancia		AA	mg PNF/cm ² iszap *h	mg PNF/g száraz. *h	mg PNF/g szervesa. *h
			60 perc után	80 perc után				
1	33,0	15,5	0,412	0,449	0,037	0,34	10,4	22,1
2	33,0	21,0	0,215	0,279	0,064	0,59	18,0	28,3
3	35,0	18,5	0,098	0,119	0,021	0,19	5,6	10,5
4	36,5	22,0	0,585	0,620	0,035	0,32	8,9	14,8
5	33,0	19,0	0,316	0,362	0,046	0,43	12,9	22,5
6	33,0	22,5	0,192	0,244	0,052	0,48	14,6	21,4
7	33,0	19,5	0,082	0,116	0,034	0,32	9,6	16,2
8	34,0	18,5	0,030	0,060	0,03	0,28	8,2	15,0
9	33,5	20,0	0,477	0,510	0,033	0,31	9,1	15,3
10	29,5	17,5	0,182	0,216	0,034	0,32	10,7	18,0
Átlag	33,4	19,4	0,259	0,298	0,039	0,36	10,8	18,4
Szórás	1,8	2,1	0,183	0,185	0,012	0,11	3,5	5,1
RSD%	5,3	10,9	70,8	62,1	31,8	31,8	32,8	27,9

Az inkubálási idő változtatása:

Lipáz aktivitás, 45°C, 40-60 min inkubálási idő, 1 cm ³ iszapvíz minta (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia		AA	mg PNF/cm ³ iszap *h	mg PNF/g szára. *h	mg PNF/g szervesa. *h
			40 min után	60 min után				
1	28,0	17,5	1,025	1,105	0,080	0,74	26,5	42,4
2	32,5	20,5	0,279	0,337	0,058	0,54	16,6	26,2
3	31,5	18,0	0,395	0,486	0,091	0,84	26,8	46,9
4	34,5	19,0	0,586	0,695	0,109	1,01	29,3	53,2
5	34,0	23,5	1,288	1,387	0,099	0,92	27,0	39,1
6	35,5	21,0	0,775	0,880	0,105	0,97	27,4	46,4
7	32,5	17,5	1,719	1,810	0,091	0,84	26,0	48,2
8	35,0	19,5	1,188	1,276	0,088	0,82	23,3	41,9
9	35,5	16,0	0,599	0,682	0,083	0,77	21,7	48,1
10	33,0	19,5	0,791	0,889	0,098	0,91	27,5	46,6
Átlag	33,2	19,2	0,865	0,955	0,090	0,84	25,2	43,9
Szórás	2,3	2,1	0,443	0,447	0,015	0,14	3,7	7,4
RSD%	6,9	11,1	51,2	46,8	16,1	16,1	14,8	16,8

Lipáz aktivitás, 45°C, 60-80 min inkubálási idő, 1 cm ³ iszapvíz minta (mezofil hőmérsékletű rothasztóból)								
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia		AA	mg PNF/cm ³ iszap ·h	mg PNF/g szára. ·h	mg PNF/g szervesa. ·h
			60 min után	80 min után				
1	28,0	17,5	0,989	1,121	0,132	1,22	43,7	70,0
2	32,5	20,5	0,337	0,482	0,145	1,34	41,4	65,6
3	31,5	18,0	0,486	0,625	0,139	1,29	40,9	71,6
4	34,5	19,0	0,695	0,835	0,140	1,30	37,6	68,3
5	34,0	23,5	1,387	1,569	0,182	1,69	49,6	71,8
6	35,5	21,0	0,880	1,030	0,150	1,39	39,2	66,2
7	32,5	17,5	1,810	1,960	0,150	1,39	42,8	79,5
8	35,0	19,5	1,276	1,412	0,136	1,26	36,0	64,7
9	35,5	16,0	0,682	0,822	0,140	1,30	36,6	81,1
10	33,0	19,5	0,889	1,058	0,169	1,57	47,5	80,4
Átlag	33,2	19,2	0,943	1,091	0,148	1,38	41,5	71,9
Szórás	2,3	2,1	0,444	0,449	0,016	0,15	4,5	6,3
RSD%	6,9	11,1	47,1	41,2	10,6	10,6	10,9	8,7

Melléklet 9.: A rothasztó tornyok ellenőrzése szennyvíziszap celluláz aktivitásának meghatározásával

Szükséges anyagok, eszközök: 1000 cm³-es főzőpohár, csavaros vagy dugós kémcső (~30 cm³-es), üvegpipetták, termosztát, centrifuga, spektrofotométer küvetákkal, mágneses keverő, pH-mérő, elektromos melegítő, hűtőgép, karboximetil-cellulóz (CMC szubsztrát), előkezelt (szárfított, darált) fű, nátrium-acetát (CH₃COONa.3H₂O), jégcetet, 3,5-dinitro-szalícilsav, 2 m/m%-os nátrium-hidroxid-oldat, fenol, nátrium-szulfít, kálium-nátrium-tartarát.

Reagens oldatok elkészítése:

Acetát puffer: 4,1 g CH₃COONa.3H₂O-t feloldunk 900 cm³ desztillált vízben, hozzáadunk 4,0 cm³ jégcetet, majd desztillált vízzel felöltjük 1000 cm³-re. Hűtőszekrényben 4 hétig tárolható.

CMC-oldat: 2,0 g CMC-t 50 cm³ desztillált vízben feloldunk, majd hozzáadunk 2,0 cm³ acetát puffert és desztillált vízzel feltöltjük 1000 cm³-re. Hűtőszekrényben az oldat sokáig tárolható.

Dinitro-szalícilsav (DNSz): 10,0 g 3,5-dinitro-szalícilsavat 500 cm³ 2 m/m%-os nátrium-hidroxid oldatban oldunk fel, majd hozzáadunk 2,0 g fenolt és 0,5 g nátrium-szulfítot. Az így elkészített keveréket melegítjük és közben 200 g kálium-nátrium-tartarát adunk hozzá. A lehűlés után desztillált vízzel 1000 cm³-re feltöltjük az oldatot. Az oldat élénksárga színű. Sötét üvegben tároljuk.

A meghatározás menete:

A celluláz enzimaktivitás mérésénél 5 cm³ rothasztott iszapot csavaros kémcsőbe mérünk, majd 25 cm³ CMC-oldatot adunk hozzá. Egy másik kémcsőbe szintén 5 cm³ iszaphoz 0,1 g szárított, darált füvet teszünk. Mindkét keveréket homogenizáljuk, majd 24 órán keresztül inkubáljuk 37°C-on. Inkubáció után a keverékeket lecentrifugáljuk. Fontos, hogy a felülúszó tiszta legyen. Ha a centrifugálás során nem nyerünk tiszta felülúszót, akkor egy szűrést is be kell iktatnunk a további lépések elé. A szűréshez kizárólag cellulózmentes szűrőpapírt használunk. A felülúszóból kiveszünk kémcsőbe 2 cm³-t és hozzámérünk 3 cm³ DNSZ-oldatot. Homogenizálást követően 5 percre forrásban lévő vízbe helyezzük a kémcsövet, majd lehűjük szobahőmérsékletre. Ezt követően az oldatot abszorbanciáját - vakoldattal szemben - 550 nm-en hullámhosszon mérjük. Az aktivitást, kalibrációt követően, egységnyi szervesanyag által időegység alatt felszabadított glükóz mennyiségében adjuk meg.

Melléklet 10.: A celluláz enzimaktivitás módszer adaptálása céljából végzett vizsgálatok eredményei

Az inkubálási idő változtatása CMC szubsztrát esetén:

Celluláz aktivitások CMC szubsztrát esetén (4 óráis inkubáció, 37°C, 5 cm ³ mezoofil hőmérsékletű rothasztóból származó iszapminták)								
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	vak	Abszorbancia vakkal korrigált	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazn.*d
1	33,5	20,0	0,068	0,015	0,053	67,76	11412,3	1,7
2	33,0	15,5	0,125	0,028	0,097	67,12	11424,9	2,0
3	35,0	18,5	0,165	0,038	0,127	71,84	14368,1	2,1
4	35,0	18,5	0,175	0,053	0,122	61,25	12308,2	1,3
5	33,0	19,0	0,121	0,061	0,060	61,31	12561,6	1,9
6	33,0	19,0	0,046	0,021	0,025	55,81	11161,2	1,7
7	31,5	16,3	0,078	0,038	0,040	58,01	11661,4	1,8
8	28,0	15,6	0,061	0,035	0,026	55,06	11182,6	2,0
9	29,0	15,6	0,053	0,018	0,035	57,38	11475,6	2,0
10	47,5	30,5	0,088	0,021	0,067	63,88	12786,1	1,3
Atlag	33,9	18,9	0,091	0,033	0,058	60,06	12192,4	1,8
szórás	5,3	4,4	0,040	0,015	0,034	5,31	1062,3	0,2
RSD%	15,7	23,5	44,1	46,5	58,5	8,7	8,7	11,8

Celluláz aktivitások CMC szubsztrát esetén (24 óráis inkubáció, 37°C, 5 cm ³ mezoofil hőmérsékletű rothasztóból származó iszapminták)								
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	vak	Abszorbancia vakkal korrigált	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazn.*d
1	33,5	20,0	0,269	0,078	0,191	11,9	16380,2	2,4
2	33,0	15,5	0,401	0,036	0,365	109,3	21850,8	3,3
3	35,0	18,5	0,478	0,144	0,334	104,4	20876,2	3,0
4	35,0	18,5	0,523	0,038	0,485	128,1	25623,6	3,7
5	33,0	19,0	0,294	0,053	0,241	99,8	17922,2	2,7
6	33,0	19,0	0,268	0,061	0,207	99,1	17826,5	2,7
7	31,5	16,3	0,323	0,072	0,251	91,3	18266,6	2,9
8	28,0	15,6	0,238	0,077	0,161	77,2	15437,0	2,8
9	29,0	15,6	0,245	0,073	0,172	78,9	15782,9	2,7
10	47,5	30,5	0,236	0,088	0,148	75,1	15028,3	1,6
Atlag	33,9	18,9	0,33	0,07	0,26	97,51	18502,4	2,8
szórás	5,3	4,4	0,10	0,03	0,11	16,81	3362,2	0,5
RSD%	15,7	23,5	31,1	42,5	41,4	18,2	18,2	19,6

Az inkubálási idő változtatása fű szubsztrát esetén:

Celluláz aktivitások fű szubsztrát esetén (4 óráis inkubáció, 37°C, 5 cm ³ mezoofil hőmérsékletű rothasztóból származó iszapminták)								
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbancia	vak	Abszorbancia vakkal korrigált	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazn.*d
1	33,5	20,0	0,031	0,015	0,016	24,39	10878,2	1,6
2	33,0	15,5	0,097	0,028	0,069	62,72	12544,6	1,9
3	35,0	18,5	0,085	0,038	0,047	59,26	11852,9	1,7
4	35,0	18,5	0,074	0,053	0,021	55,18	11039,4	1,6
5	33,0	19,0	0,072	0,061	0,011	53,61	10721,0	1,6
6	33,0	19,0	0,053	0,021	0,032	53,76	10753,5	1,6
7	31,5	16,3	0,052	0,039	0,013	50,82	10332,9	1,7
8	28,0	15,6	0,048	0,035	0,013	53,92	10783,9	1,9
9	29,0	15,6	0,025	0,018	0,007	52,98	10595,3	1,8
10	47,5	30,5	0,071	0,021	0,050	59,74	11947,2	1,3
Atlag	33,9	18,9	0,059	0,033	0,026	55,95	11189,5	1,8
szórás	5,3	4,4	0,025	0,015	0,021	3,36	671,9	0,2
RSD%	15,7	23,5	41,8	46,5	82,5	6,0	6,0	11,4

Celluláz aktivitások fü szubsztrát esetén (24 óráis inkubálás), 37°C, 5 cm ³ mezofil hőmérsékleti rothasztóból származó iszapmintá								
Mintaszám	Szárazanyag (g/kg)	Szervesanyag (g/kg)	Abszorbania	vak	Abszorbania vakkal korrigált	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazs. *d
1	33,5	20,0	0,183	0,078	0,105	68,38	13676,4	2,0
2	33,0	15,5	0,239	0,036	0,203	83,79	16757,5	2,5
3	35,0	18,5	0,234	0,144	0,090	66,02	13204,8	1,9
4	35,0	18,5	0,069	0,038	0,031	58,75	11749,8	1,6
5	33,0	19,0	0,114	0,053	0,061	61,47	12293,0	1,9
6	33,0	19,0	0,123	0,061	0,062	61,62	12324,5	1,9
7	31,5	16,3	0,133	0,072	0,061	61,47	12293,0	2,0
8	38,0	15,6	0,132	0,077	0,055	60,52	12104,4	2,2
9	29,0	15,6	0,115	0,073	0,042	58,48	11695,7	2,0
10	47,5	30,5	0,100	0,088	0,012	53,76	10752,5	1,1
Átlag	33,9	18,9	0,144	0,072	0,072	63,23	12645,2	1,9
szórás	5,3	4,4	0,056	0,031	0,053	8,55	1669,8	0,4
RSD%	15,7	23,5	39,1	42,5	73,6	13,3	13,2	19,0

A hőmérséklet változtatása CMC szubsztrát esetén:

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése CMC szubsztrát esetén (20 °C)					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazs. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,378	137,20	27440,0	0,8	1,3
2	0,399	143,20	28640,0	0,8	1,4
3	0,397	142,63	28525,7	0,8	1,4
4	0,402	144,06	28811,4	0,8	1,4
5	0,368	134,34	26868,6	0,8	1,3
6	0,388	140,06	28011,4	0,8	1,3
7	0,345	127,77	25554,3	0,8	1,2
8	0,408	145,77	29154,3	0,9	1,4
9	0,405	144,91	28982,9	0,9	1,4
10	0,368	134,34	26868,6	0,8	1,3
átlag	0,386	139,43	27885,7	0,8	1,3
szórás	0,021	5,86	1172,3	0,0	0,1
RSD%	5,3	4,2	4,2	4,2	4,2

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése (37 °C) CMC szubsztrát esetén					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazs. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,790	254,91	50982,9	1,6	2,4
2	0,729	237,49	47497,1	1,5	2,3
3	0,745	242,06	48411,4	1,5	2,3
4	0,750	243,49	48697,1	1,5	2,3
5	0,825	264,91	52982,9	1,7	2,5
6	0,815	262,06	52411,4	1,6	2,5
7	0,821	263,77	52754,3	1,6	2,5
8	0,784	253,20	50640,0	1,6	2,4
9	0,808	260,06	52011,4	1,6	2,5
10	0,861	275,20	55040,0	1,7	2,6
átlag	0,793	255,71	51142,9	1,6	2,4
szórás	0,041	11,85	2369,8	0,1	0,1
RSD%	5,2	4,6	4,6	4,6	4,6

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése (45 °C) CMC szubsztrát esetén					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazs. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,305	116,34	23268,6	0,7	1,2
2	0,299	114,63	22925,7	0,7	1,1
3	0,315	119,20	23840,0	0,7	1,2
4	0,265	104,91	20982,9	0,6	1,0
5	0,214	90,34	18068,6	0,5	0,9
6	0,285	110,63	22125,7	0,7	1,1
7	0,275	107,77	21554,3	0,7	1,1
8	0,315	119,20	23840,0	0,7	1,2
9	0,325	122,06	24411,4	0,7	1,2
10	0,336	125,20	25040,0	0,8	1,3
átlag	0,293	113,03	22605,7	0,7	1,1
szórás	0,036	10,18	2036,6	0,1	0,1
RSD%	12,1	9,0	9,0	9,0	9,0

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése (55 °C) CMC szubsztrát esetén					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g szárazs. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,208	88,63	17725,7	0,5	0,8
2	0,159	74,63	14925,7	0,5	0,7
3	0,219	91,77	18354,3	0,6	0,9
4	0,223	92,91	18582,9	0,6	0,9
5	0,197	85,49	17097,1	0,5	0,8
6	0,179	80,34	16068,6	0,5	0,8
7	0,218	91,49	18297,1	0,6	0,9
8	0,188	82,91	16582,9	0,5	0,8
9	0,215	90,63	18125,7	0,5	0,9
10	0,231	95,20	19040,0	0,6	0,9
átlag	0,204	87,40	17480,0	0,5	0,8
szórás	0,023	6,46	1292,2	0,0	0,1
RSD%	11,1	7,4	7,4	7,4	7,4

A hőmérséklet változtatása fű szubsztrát esetén:

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése (20 °C) fű szubsztrát esetén					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g száraza. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,132	66,91	13382,9	0,4	0,6
2	0,139	68,91	13782,9	0,4	0,7
3	0,124	64,63	12925,7	0,4	0,6
4	0,159	74,63	14925,7	0,4	0,7
5	0,139	68,91	13782,9	0,4	0,7
6	0,118	62,91	12582,9	0,4	0,6
7	0,102	58,34	11668,6	0,3	0,6
8	0,178	80,06	16011,4	0,5	0,8
9	0,215	90,63	18125,7	0,5	0,9
10	0,229	94,63	18925,7	0,6	0,9
átlag	0,154	73,06	14611,4	0,4	0,7
szórás	0,042	11,96	2392,6	0,1	0,1
RSD%	27,3	16,4	16,4	16,4	16,4

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése (37 °C) fű szubsztrát esetén					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g száraza. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,282	109,77	21954,3	0,7	1,0
2	0,299	114,63	22925,7	0,7	1,1
3	0,197	85,49	17097,1	0,5	0,8
4	0,271	106,63	21325,7	0,7	1,0
5	0,278	108,63	21725,7	0,7	1,0
6	0,296	113,77	22754,3	0,7	1,1
7	0,275	107,77	21554,3	0,7	1,0
8	0,219	91,77	18354,3	0,6	0,9
9	0,314	118,91	23782,9	0,7	1,1
10	0,315	119,20	23840,0	0,7	1,1
átlag	0,275	107,66	21531,4	0,7	1,0
szórás	0,039	11,04	2207,4	0,1	0,1
RSD%	14,1	10,3	10,3	10,3	10,3

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése (45 °C) fű szubsztrát esetén					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g száraza. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,093	55,77	11154,3	0,3	0,6
2	0,072	49,77	9954,3	0,3	0,5
3	0,102	58,34	11668,6	0,4	0,6
4	0,078	51,49	10297,1	0,3	0,5
5	0,097	56,91	11382,9	0,3	0,6
6	0,125	64,91	12982,9	0,4	0,6
7	0,126	65,20	13040,0	0,4	0,7
8	0,114	61,77	12354,3	0,4	0,6
9	0,117	62,63	12525,7	0,4	0,6
10	0,121	63,77	12754,3	0,4	0,6
átlag	0,105	59,06	11811,4	0,4	0,6
szórás	0,019	5,52	1103,2	0,0	0,1
RSD%	18,5	9,3	9,3	9,3	9,3

Celluláz aktivitás hőmérsékletfüggése (55 °C) fű szubsztrát esetén					
Mintaszám	A	glükóz koncentráció (mg/dm ³)	mg glükóz / dm ³ iszap *d	g glükóz /g száraza. *d	g glükóz /g szervesa. *d
1	0,131	66,63	13325,71	0,4	0,6
2	0,120	63,49	12697,1	0,4	0,6
3	0,128	65,77	13154,3	0,4	0,6
4	0,112	61,20	12240,0	0,4	0,6
5	0,097	56,91	11382,9	0,3	0,5
6	0,105	59,20	11840,0	0,4	0,6
7	0,095	56,34	11268,6	0,3	0,5
8	0,119	63,20	12640,0	0,4	0,6
9	0,124	64,63	12925,7	0,4	0,6
10	0,118	62,91	12582,9	0,4	0,6
átlag	0,115	62,03	12405,7	0,4	0,6
szórás	0,012	3,55	709,9	0,0	0,0
RSD%	10,8	5,7	5,7	5,7	5,7